

II-506

底泥界面における溶存酸素と磷の交換フラックスに及ぼす流れの影響のモデル化

九大・工 正 員 中村 由行

九大・工 学生員 御子神 学

1. 研究の目的 水・底泥界面における物質移動に関する研究の多くは生物・化学的なものであり、流れの影響を解析した研究はほとんどない。しかしながら、例えば、流れがある場合の底質による酸素消費フラックス(SOD)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知られている。これは、底面直上に形成されるごく薄い濃度境界層での拡散輸送が律速となって全体のSODの量を規定しているためであると考えられる。従って、境界層理論を用いて、SODや磷の溶出フラックスが流速のどういう関数になるのかを、理論的に解析することが本研究の目的である。

2. 濃度境界層における拡散輸送のモデル化 界面近傍の過程を、界面直上の濃度境界層での拡散輸送と、底質内部における反応とに分けて考える。境界層内の物質輸送は、乱流境界層の輸送理論を応用する。一方、底質内部はIshikawa & Nishimura(1989)の解析を応用し、DO及び無機磷の濃度分布を求める。定常状態で、界面におけるDO濃度とフラックスの連続性から、SODおよび磷溶出フラックスの満たすべき関係式を求める。

最近、著者らは、底泥境界層での物質の移動フラックス J が、以下のように表されることを見いだした(Nakamura & Stefan, 1993)。

$$J = f(C_f, S_c) u_\infty (C_\infty - C_w) = \frac{2}{\pi} n \sqrt{C_f S_c}^{-3/4} u_\infty (C_\infty - C_w) \quad (1)$$

ここで、 u_∞ は壁面から十分離れた場所における流速と物質の濃度、 C_w は水-底泥界面における濃度、 C_f は抵抗係数、 S_c はシュミット数、 n ($=0.124$)は定数である(図1参照)。彼らは、底泥内部の反応に関して一般化したモデル化を行い、SODが満たすべき関係式を求めているが、ここでは磷の溶出に着目した解析を行う。

3. 底泥内における反応及び磷溶出のモデル 本研究では、境界層モデル(式(1))に、石川らの磷溶出モデルを結合し、SODおよび磷溶出フラックスに及ぼす流れの影響をモデル化する。

好気条件下では磷の溶出がかなり抑えられることが知られているが、これは嫌気下で作られる第一鉄やマンガンイオンが溶存酸素と反応して吸着能に富む水酸化物となり、それが磷を吸着することにより磷の溶出が抑えられると考えられている。Ishikawa & Nishimura (1989)は、第一鉄イオンの酸化反応速度 r を次式

$$r = k_2 [\text{Fe}^{2+}] [\text{OH}^-] [\text{DO}] \quad (k_2 = 2.9 \times 10^7 \text{ M}^{-2} \text{ s}^{-1}, \quad 7.1 < \text{pH} < 8.1) \quad (2)$$

で与え、第一鉄イオン、磷酸態磷、溶存酸素の三独立変数からなるモデルを作成し、溶存酸素濃度が小さいときの近似解を求めている。それによると、底泥中における溶存酸素は第一鉄の酸化と好気性バクテリアによる消費(一次反応速度定数 k_b)によって失われるものとされ、結局、SODおよび磷溶出フラックス ϕ_p は以下のように書ける。

$$\text{SOD} = \varepsilon D_{Ow} / L, \quad (3) \quad \phi_p = \sqrt{\varepsilon k_{ad} D_p} C_p(\infty) - \alpha \varepsilon \lambda k_o C_f(\infty) C_{ow} \{1 - (2\lambda/L) \tanh(L/2\lambda)\} \quad (4)$$

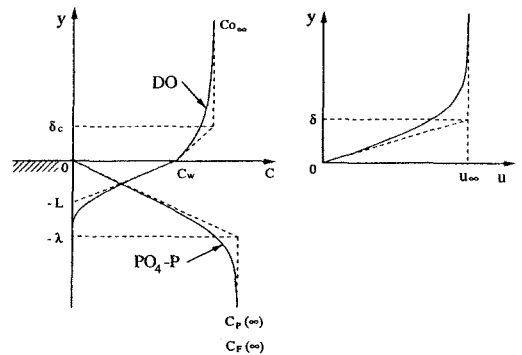


図1. 界面近傍の流速及び濃度分布の模式図

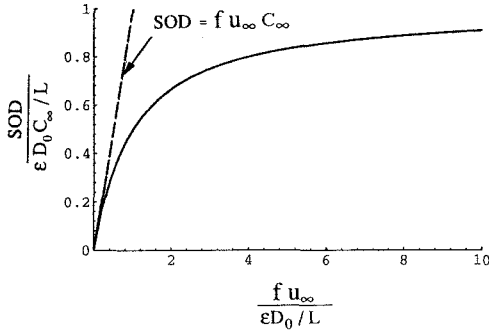


図2. SODと流速との関係

ここで、 ε 、 D 、 L 、 k_{ad} 、 $\lambda (= \sqrt{\varepsilon D p / k_{ad}})$ 、 α はそれぞれ空隙率、分子拡散係数、好気層の厚さ、吸着定数、 ϕ と第一鉄イオンの濃度変化を示す代表長さスケール及び水酸化第二鉄一モル当りに吸着するする ϕ のモル数である。また、 $k_0 = k_2 [OH^-]$ 、添字 o 、 p 、 f はそれぞれ溶存酸素、磷酸態 ϕ 及び第一鉄イオンを示す。式(1)及び(4)から C_w を消去することにより、SOD および ϕ の溶出フラックスに及ぼす流れの効果が次式で表現できる。

$$SOD = \frac{f u_{\infty}}{\varepsilon D_0 / L + f u_{\infty}} \frac{\varepsilon D_0}{L} C_{\infty}, \quad \phi_p = \phi_p^{(0)} - \frac{f u_{\infty}}{\varepsilon D_0 / L + f u_{\infty}} \phi_p^{(1)} \quad (5)$$

ここで、 $\phi_p^{(0)}$ は式(4)における右辺第一項を表わし、嫌気下における ϕ の溶出フラックスを示す。 $\phi_p^{(1)}$ は同じ式の右辺第二項において C_w を C_{∞} に置き換えたものに等しい。

図2は、SOD と流速の関係を示したものである。SOD は流速が小さい領域では流速に比例して増加し、底泥内部の反応量に依存しない。これは、境界層における拡散輸送が律速段階となっているためである。一方、流速が増加すると一定値に漸近する。この領域では、底泥内部の反応が律速となっている。これはBelanger(1981)やBoyntonら(1981)が測定した実験事実をよく説明する。

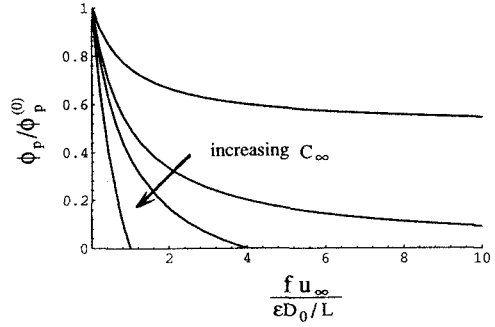
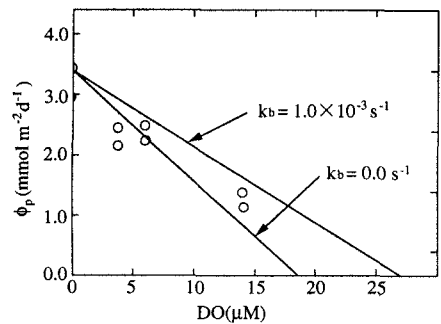
図3は ϕ の溶出フラックスと流速との関係を示したものである。 ϕ の溶出フラックスは流れがない場合に最大値をとり、流速の増加と共に減少する。バルクの溶存酸素濃度が臨界値以上であれば、溶出は0となる。その臨界濃度 C_{crit} は、式(4)より、以下の様に与えられる。

$$C_{crit} = \frac{\varepsilon D_0 / L + f u_{\infty}}{f u_{\infty}} \frac{D_f}{k_0 \lambda^2} [1 - \frac{2\lambda}{L} \tanh(1/2 \lambda)] \quad (6)$$

また、図4は、 D_0 濃度と ϕ の溶出フラックスとの関係に関して、石川らの実験値とモデルによる計算結果を比較したものである。但し、小林らが手賀沼底泥で実験した速度定数 $k_0 = 3.1 \times 10^2 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (pH=7.88 換算値)を用いた。また、実験は攪はんして行われているので、流速は十分大きく境界層での輸送が律速にはならないものと考えた。また、好気性 ϕ の反応速度定数 k_b は文献値の最大と最小値を仮定している。モデルによる計算は実験結果をよく説明し、モデルの妥当性が示された。

4. 結論 乱流境界層理論を底泥界面に適用することにより、SOD や ϕ の溶出フラックスを流速の関数として、理論的に表現した。モデルによる計算値は石川らの実験結果をよく再現する。

参考文献 Belanger (1981) Water Res. 15, pp.267-274.; Boynton et al. (1981) Mar. Biol. 65, pp.185-190.; Ishikawa & Nishimura (1989) Water Res. 23, pp.351-359.; Nakamura & Stefan (1993) submitted to J. Env. Eng., ASCE.; 小林・西村 (1990) 水質汚濁研究, 13, pp.295-302.


 図3. ϕ の溶出フラックスと流速との関係

 図4. ϕ の溶出フラックスと D_0 濃度との関係