

リンの溶出速度に及ぼす流れの影響

九州大学・学生員 御子神 学

九州大学・正 員 中村 由行

九州大学・正 員 小松 利光

1. 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・科学的なものであり、流れの影響を考慮した研究は少ない。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、静水中に於ける値に比べてかなり大きくなることが知られている。これは、底面直上の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。本研究では、SODやリンの溶出フラックスがどのような関数になるかを理論的に解析する。

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、界面直上での拡散輸送と、底質内部における反応にわけて考える。境界層内の拡散輸送は、乱流境界層の輸送理論を応用する。一方、底質内部はIshikawaらの解析を応用し、DO及び無機リンの濃度分布を求める。界面における濃度とフラックスの連続性から、SOD及びリンの溶出フラックスの満たすべき関係式を求める。

滑らかな界面を持つ底泥境界層での物質フラックス J は、以下の様に表わされる²⁾。

$$J = f(C_f, Sc) u_{\infty} (C_{\infty} - C_0) = \frac{2}{\pi} n \sqrt{C_f} Sc^{-3/4} u_{\infty} (C_{\infty} - C_0) \quad (1)$$

ここで、 u_{∞} 、 C_{∞} は界面から十分離れた場所における流速と濃度、 C_w は界面における濃度、 C_f は抵抗係数、 Sc はシュミット数、 $n(=0.124)$ は定数である(図-1参照)。

3. 底質内部における反応及びリンの溶出モデル

本研究では、境界層モデル(式(1))に、石川らのリンの溶出フラックスモデルを修正したものを結合し、SOD及びリンフラックスに及ぼす流れの影響をモデル化する。

好気条件下ではかなりリンの溶出が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、それがリンを吸着することによりリンの溶出が抑えられると考えられている。Ishikawaらは、第一鉄イオンの酸化反応速度を与え、第一鉄イオン、リン酸態リン、溶存酸素の3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。底泥中の溶存酸素は第一鉄の酸化と好気性細菌による消費(一次反応速度定数 k_b)によって失われるものとモデル化されている(図2参照)。彼らは境界層における拡散抵抗を考慮していないので、数値モデルの境界条件を修正しなければならない。修正石川モデルの結果と式(1)を連立することにより、SOD及びリン溶出フラックス ϕ_p に及ぼす流れの効果が次式で表現できる。

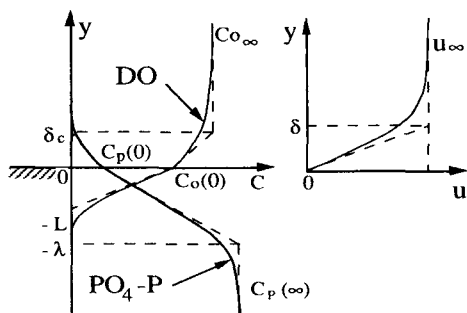


図1 界面近傍の流速及び濃度分布の模式図

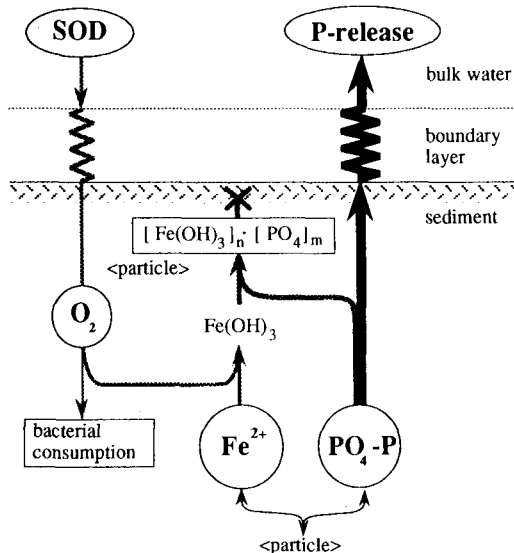


図2 リンの溶出に及ぼす酸素の影響の模式図

$$\tilde{SOD} = \frac{\tilde{U}}{D_0^{1/4}} \frac{\tilde{D}_0 \tilde{C}_0}{\tilde{L} + \tilde{U}} \quad (2)$$

$$\tilde{\phi}_P = -\frac{\tilde{U}}{1+\tilde{U}} + \frac{\tilde{k}_o \tilde{C}_0 \tilde{U}^2 \left[\left(1 - \frac{2}{\tilde{L}} \tanh\left(\frac{\tilde{L}}{2}\right) \right) \tilde{U} - \left(\frac{1}{\tilde{L}} - \coth \tilde{L} \right) \right]}{(\coth \tilde{L} + \tilde{U}) (D_0^{1/4} / \tilde{L} + \tilde{U}) (1+\tilde{U})} \quad (3)$$

ここで、～は無次元量である事を示す。

図3はリンの溶出フラックスと流速との関数を示したものである。無酸素条件下においては、流速が小さい時、拡散輸送が律速となり、速度の増加と共にリンの溶出フラックスも増加しある一定値に漸近する。ところが、溶存酸素の存在下では流速の増加と共にリンの溶出を抑える働きが強くなり、リンの溶出フラックスはかえって減少する。つまり、リンの溶出量はある流速で極大値をとる。

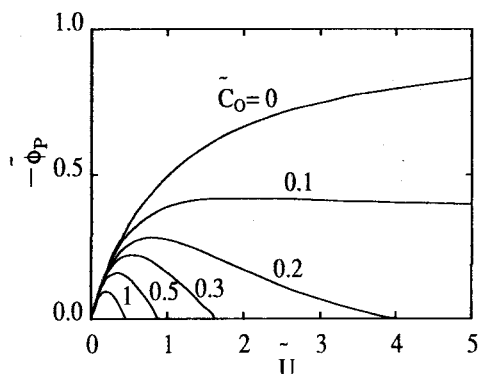


図3 リンの溶出フラックスと流速との関係

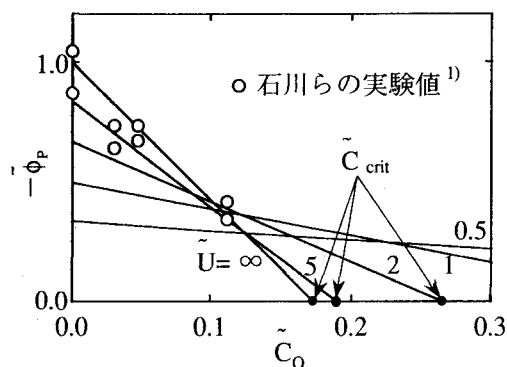


図4 リンの溶出フラックスと溶存酸素濃度との関係

図4は、DO濃度とリン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。ただし、小林の実験値³⁾に基づいて $k_o = 3.1 \times 10^2 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $k_b = 5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ とした。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。

また、バルクの溶存酸素濃度が以下の式で与えられる臨界値以上であれば、溶出は止まることが示される。

$$\tilde{C}_{\text{crit}} = \frac{(\coth \tilde{L} + \tilde{U}) (D_0^{1/4} / \tilde{L} + \tilde{U})}{\tilde{k}_o \tilde{U} \left[\left(1 - \frac{2}{\tilde{L}} \tanh\left(\frac{\tilde{L}}{2}\right) \right) \tilde{U} - \left(\frac{1}{\tilde{L}} - \coth \tilde{L} \right) \right]} \quad (4)$$

図5は、リンの溶出量を流速とバルクの溶存酸素濃度との関数として等高線で示したもので、溶出が止まる臨界濃度が図の太実線である。流速が大きくなると共に臨界濃度は小さくなる。

4. 結論 リンの溶出フラックスを流速の関数として表現した。モデルの計算値は石川らの実験結果をよく再現した。リンの溶出が止まる臨界の溶存酸素濃度を流速の関数として表わした。

参考文献 1) Ishikawa & Nishimura (1989) Water Res. 23, pp.351-359.; 2) Nakamura & Stefan (1994) J. Env. Eng., ASCE.(accepted); 3) 小林・西村(1990) 水質汚濁研究, 13, pp.295-302.

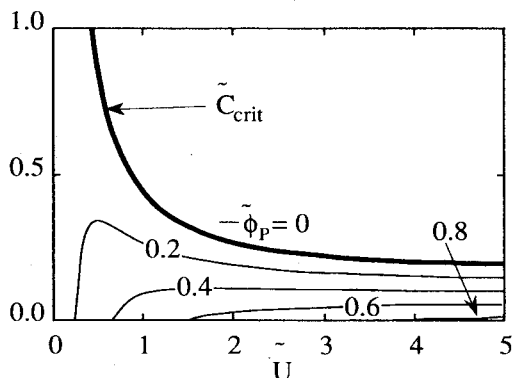


図5 リン溶出量の等高線