

底泥からの溶質の溶出に及ぼす底泥内部での吸脱着の影響について

大分高専 東野 誠
神戸大学工学部 ○神田 徹

1. はじめに

底泥による溶存酸素(DO)の消費や底泥からの栄養塩の溶出等は、いずれも水・底泥間の溶解性物質(溶質)の移動に起因する水質問題であり、したがって、このような水・底泥境界面での溶質移動機構の解明は、水環境を良好に保つにあたり重要な課題である。筆者らは、底泥中の溶解性有機物質が直上水中へと溶出し、水中のDOを消費する場合を想定して、このような溶質の移動現象について検討してきた¹⁾。すなわち、一方向流れ場において底泥材料としてカオリナイトを、溶質としてメチレンブルーを用いて溶出実験を行い、溶出フラックスに及ぼす底泥直上の水流速および底泥物性(含水比・溶質含有量)の影響について調べた。本研究では、底泥内部での溶質の濃度分布に着目して吸脱着を伴う多孔体内物質移動について検討を行い、溶出フラックスを底泥直上の流れ場の諸条件と底泥物性(含水比・溶質含有量)、および底泥内部での吸脱着を表すパラメータの関数としてモデル化した。

2. 底泥から流水への溶質の移動現象

図-1は、水・底泥境界面近傍における溶質の濃度分布を模式的に示したものである。この図より、溶出現象について以下のように考えられる。まず、界面直上の濃度境界層では分子拡散による物質移動により、溶質は底泥表面から直上水中へと移動する。一方、底泥表層部においても底泥内部から表面に向かって溶質は移動するが、この場合には、底泥粒子との間の吸脱着の影響を受ける。ここで、底泥内部における溶質の濃度分布の時間的な変化が無視できるとすれば、界面を横切る溶質のフラックスは、濃度境界層における分子拡散による物質移動と、底泥内部における吸脱着を伴う物質移動の両者によって決定される。すなわち、濃度境界層における鉛直上向きの溶質のフラックスと界面における底泥から水中へと向かう溶質のフラックスは等しく、これらの物質移動がバランスするところで界面濃度が決まる。

界面での物質移動機構を以上のように考え、溶出過程のモデル化を行う。解析にあたっては、定常状態であることを前提とし、化学的な物質変換や微生物の代謝等は考慮せず、底泥粒子と溶質との間の吸脱着および物質の移動を対象とする。

3. 濃度境界層における物質移動

上述の仮定の下で、濃度境界層における物質移動に対して熱移動の解析を応用すると、界面での溶質のフラックス(溶出フラックス) J は次式で表される¹⁾。

$$J = -\frac{3\sqrt{6}}{8\pi} n \sqrt{f Sc}^{-\frac{2}{3}} U (C_{\infty} - C_w) \quad (1)$$

ここに、 U : 断面平均流速、 C_{∞} : 界面から十分離れた上方の位置における溶質濃度、 C_w : 界面での溶質濃度、 $Sc(=\nu/D)$: シュミット数、 $f(=8\tau_0/\rho U^2)$: 摩擦抵抗係数、 ν : 動粘性係数、 D : 溶質の分子拡散係数、 τ_0 : 底泥せん断応力、 ρ : 水の密度、 $n(=0.1)$: 定数である。

4. 底泥内部における吸脱着を伴う物質移動

底泥内部での吸脱着を伴う物質移動の解析にあたり、底泥内部では表層部の溶質濃度が変化する部分を除いて底泥粒子と溶質とは吸着平衡状態にあり、間隙水中の溶質濃度 C_{∞} は平衡濃度で近似できるとする。ところで、定常状態において底泥内のコントロールボリュームを考えれば、ここでの物質収支は次式で表される。なお、本研究では底泥粒子と溶質との間の吸脱着過程を Langmuir の吸着モデルを用いて表現している。

$$\phi D \frac{d^2 C}{dy^2} - k_1 C \left(1 - \frac{q}{q_m}\right) + k_2 \frac{q}{q_m} = 0 \quad (2)$$

ここに、 k_1 : 吸着速度定数、 k_2 : 脱着速度定数、 q : 吸着剤単位重量あたりの溶質の吸着量、 q_m : 飽和吸着量。なお、 ϕ は底泥の空隙率であり、含水比 w および底泥粒子の比重 G_s の関数である。

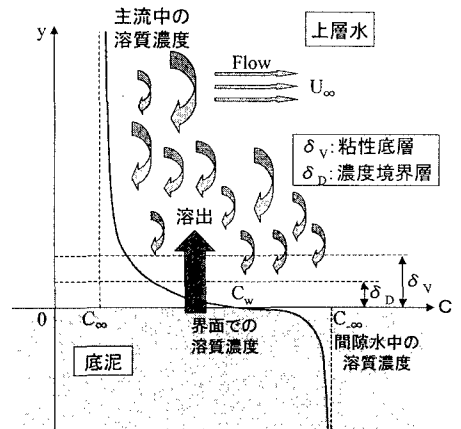


図-1 底泥から流水への溶質の溶出現象(概念図)

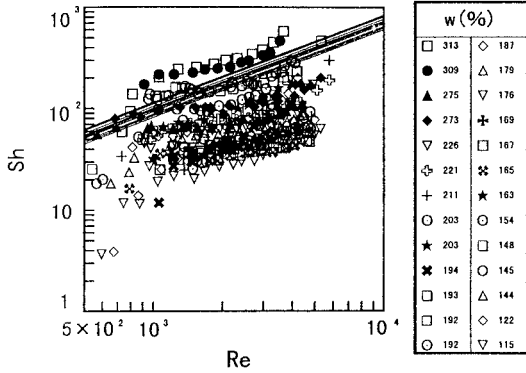


図-2 式(9)による溶出フラックス推定値と実験値の比較

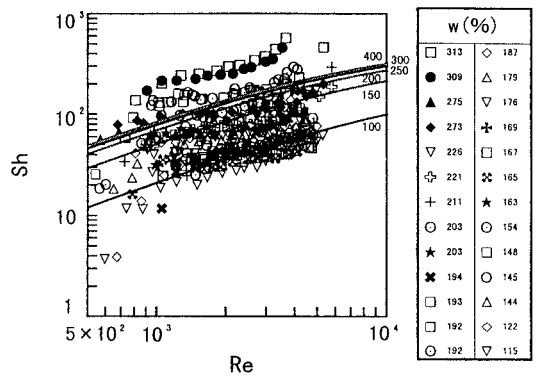


図-3 式(5)による溶出フラックス推定値と実験値の比較
(図中の数字は含水比 w の値を示す)

境界条件は

$$y=0 \text{ において } C=C_w, \quad y=-\infty \text{ において } C=C_\infty \quad (3)$$

式(3)で表される境界条件の下に、式(2)を解けば、底泥内部での溶質の濃度分布が得られ、この濃度分布より水・底泥境界面での溶質のフラックス J を表す式が求まる。

$$J = -\phi D \lambda \left[(C_w - C_\infty) + Q_\star \left\{ \frac{2.11C_\infty + 1}{2.11(1+\alpha)} + \frac{C_w - C_\infty}{\alpha + 2} \right\} \right] \quad (4)$$

ここに、 α は定数である。

5. 溶出フラックスの推定式

濃度境界層および底泥内部における物質移動の解析から得られた式(1)と式(4)とを連立させ、界面濃度 C_w を消去すれば、溶出フラックス J が得られる。この J を無次元表示した式(6)のシャーウッド数 Sh を用いると、溶出フラックスは次式で与えられる。

$$Sh = \frac{\frac{3\sqrt{6}}{8\pi} nm Sc^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{7}{8}}}{1 + \frac{3\sqrt{6}}{8\pi} nm Sc^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{7}{8}} \lambda_\star \frac{\alpha + 2}{\alpha + 2 - Q_\star}} \cdot \left[1 + \frac{\alpha + 2}{\alpha + 2 - Q_\star} \cdot \frac{2.11C_\infty + 1}{2.11(1+\alpha)(C_\infty - C_w)} Q_\star \right] \quad (5)$$

ここに、

$$Sh = \frac{h_D R_H}{D} = \frac{J}{C_\infty - C_w} \cdot \frac{R_H}{D} \quad (6), \quad Re = \frac{UR_H}{\nu} \quad (7), \quad \lambda_\star = \frac{1}{R_H \lambda \phi} \quad (8)$$

上式中の $h_D (=J/(C_\infty - C_w))$ は物質伝達率、 R_H は径深、また、 Re はレイノルズ数である。なお、式(1)中の摩擦抵抗係数 f には、Blasius の式 ($f=0.3164(4Re)^{-1/4}$) を用いた。したがって、式(5)中の定数は $m=0.473$ である。

一方、底泥内部での溶質の濃度分布を考慮せず、界面濃度 C_w を底泥間隙水中の溶質濃度 C_∞ で近似すれば、式(1)、(6)より Sh 数は次式で表される。

$$Sh = \frac{3\sqrt{6}}{8\pi} nm Sc^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{7}{8}} \quad (9)$$

図-2 に Sc 数を実験時の値とした場合の式(9)による推定値を実験値と併せて示す。この図より、推定値は実験条件 (Sc 数) によって余り変化しないが、含水比の高い底泥を用いた実験値はグラフ上方にプロットされ、底泥含水比が低くなるとともにプロットはグラフ下方へとシフトするのが確認できる。

次に、無次元パラメータ $Q_\star$ 、 $\lambda_\star$ を含水比 w の関数とし、 w を様々に変化させた場合の式(5)による推定値を実験値と併せて図-3 に示す。なお、前述のように Sc 数による推定値の変化は僅かであるので、ここでは一定値 ($Sc=5000$) を与えた。図-3 によると、式(5)による推定値は、含水比が低い場合にはグラフの下側にプロットされ、含水比が高くなるとともにグラフの上側にシフトするのが見て取れる。この推定値は、高含水比の底泥を用いた実験値を除けば上述の実験値の傾向を概ね再現しており、この結果は本モデルの妥当性を示すものといえよう。

参考文献

- 1) 東野 誠, 神田 徹: 底泥から流水への溶解性物質の溶出過程, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.745-750, 1998.