

溶解性物質の溶出過程における 底泥内部での吸脱着の影響

THE INFLUENCE OF ADSORPTION ON DIFFUSIONAL MASS TRANSFER FROM BOTTOM SEDIMENT TO FLOWING WATER

東野 誠¹・神田 徹²
Makoto HIGASHINO and Tohru KANDA

¹正会員 博(工) 大分工業高等専門学校助手 土木工学科 (〒870-0152 大分市大字牧1666番地)

²正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

Fundamental examination concerning diffusional mass transfer across a sediment-water interface is performed in order to formulate a model for estimating the released flux of dissolved substance from bottom sediment to flowing water. Mass transfer through diffusive boundary layer is modeled by applying the analysis of heat transfer. On the other hand, we consider that the process of mass transfer in the sediment is influenced by adsorption between solute and sediment particle in sediment, which is introduced to formulate the distribution of solute in sediment and mass flux at the sediment-water interface. Consequently, the equation to estimate diffusional mass transfer is formulated as a function of flow velocity, parameters of adsorption and physical properties of sediment such as water content of sediment and amount of dissolved substance contained in sediment.

Key Words : *Bottom sediment, diffusional mass transfer, dissolved substance, adsorption, diffusive boundary layer, sediment-water interface*

1. はじめに

本研究は、水域底層部における水・底泥境界面での物質移動について基礎的な検討を行ったものである。界面での物質交換は従来、底泥による溶存酸素(DO)消費や栄養塩の溶出等に関連して、静水を対象に主に生物・化学的要素に注目した研究が行われてきた。最近では底泥上の流れが物質移動に及ぼす影響に着目し、特に水中から底泥に移行するDOフラックスに関して理論的および実験的研究が進められつつある^{1)~7)}。

筆者らは、底泥中の溶解性有機物質が直上水中へ溶出して水中のDOを消費する場合を想定し、この溶出過程のモデル化について検討してきた⁸⁾。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、溶解性物質(溶質)としてメチレンブルーを用いて溶出実験を行い、底泥から流水への溶質の溶出に及ぼす底泥直上の流れの影響、および含水比や溶質含有量等の底泥の物性の影響について調べるとともに、溶出フラックス推定のためのモデルについて検討した。

実験結果によれば、直上水の流速の増加とともに濃度

境界層厚さは薄くなり濃度勾配が大きくなるので、勾配に比例する溶出フラックスは流速とともに増加する。一方、溶出フラックスに及ぼす底泥の物性の影響については、底泥間隙水中の溶質濃度が底泥の物性によって変化することに加えて、底泥内部での吸脱着を伴う多孔体内の物質移動の影響が考えられる。このように、溶出フラックスは、界面直上の濃度境界層におけ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規定される。したがって、溶出フラックスの推定にあたっては、この両者の影響を表現できるようなモデルを構成する必要がある。

そこで、本研究では、底泥内部における吸脱着を伴う物質移動について検討を行い、溶質の濃度分布を定式化した。次に、この濃度分布より得られる界面での物質フラックスと、濃度境界層における物質移動の解析結果とを対応させることにより、溶出フラックスを直上水の流れ場の諸条件と底泥の物性(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定式化した。さらに、その妥当性を溶出実験結果との比較により考察した。

2. 水・底泥境界面での溶出現象の定式化

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。図中の濃度境界層厚さ δ_D は通常極めて薄く、界面近傍において溶質の濃度分布を測定した例は少ないが、ここではDOの濃度分布の測定例⁷⁾を参考に図のような濃度分布を想定した。この図に示すように、界面直上の濃度境界層から底泥表層部にかけて濃度が急激に変化していると推察される。

現時点では界面近傍、特に底泥内部での溶質の濃度分布を精確に測定することは極めて難しいことを考慮して、筆者らは界面濃度を底泥間隙水濃度で近似し、その界面濃度の算定式(後述の式(12))を熱移動の解析を応用した物質移動のモデル中に組み込み、溶出過程をモデル化した⁸⁾。このモデルでは、底泥内部の溶質濃度は一様であると仮定し、熱移動とは異なる溶出現象特有の底泥粒子と溶質との間の吸脱着過程を、別のモデル化によって表現した。

本研究においては、図-1のように底泥内部での溶質の濃度分布を考慮した解析を行う。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、底泥粒子と溶質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、界面での物質フラックスは、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物質フラックスと界面における底泥から水中へと向かう物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と考えられる。

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し、以下のような仮定をおく。

- 1) 水・底泥境界面は水理学的滑面で固定床であり、底泥の流動や巻き上げは考慮しない。
- 2) 流速や溶質濃度は鉛直方向にのみ変化し、流れ方向には一様である。
- 3) 濃度境界層内でのせん断応力、物質フラックスはそれぞれ底面せん断応力および界面での物質フラックスに等しく、一定値である。
- 4) 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は平衡濃度で近似できる。

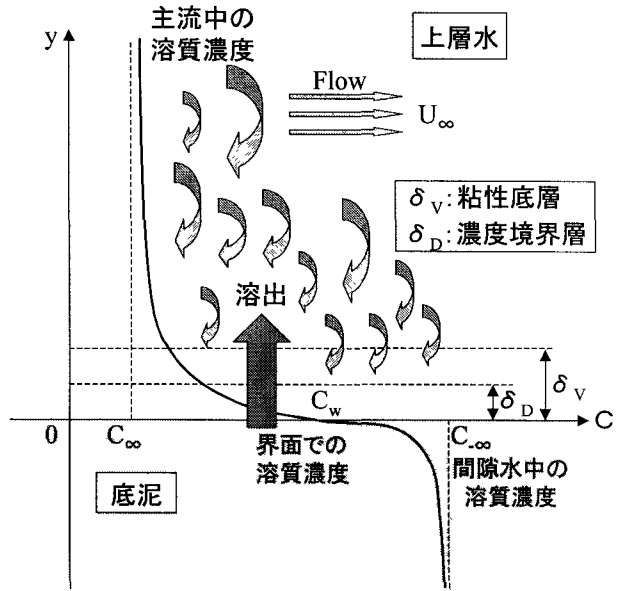


図-1 底泥から流水への溶質の溶出現象(概念図)

(1) 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、界面での物質フラックス(溶出フラックス) J は次式で表される⁸⁾。

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

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 : 物質の分子拡散係数、 τ_0 : 底面せん断応力、 ρ : 水の密度、 $n(=0.1)$: 定数である。

また、界面直上の溶質濃度 C の分布は次式のようなものである。

$$\frac{C_{y^+} - C_w}{C_{\infty} - C_w} = \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \ln \frac{(ny^+ + Sc^{-\frac{1}{3}})^2}{n^2 y^{+2} - nSc^{-\frac{1}{3}} y^+ + Sc^{-\frac{2}{3}}} + \frac{3}{2\pi} \tan^{-1} \frac{2nSc^{\frac{1}{3}} y^+ - 1}{\sqrt{3}} + \frac{1}{4} \quad (2)$$

上式において、 y^+ は以下のような無次元量であり、溶質濃度 C_{y^+} は y^+ の関数である。

$$y^+ = \frac{U_* y}{\nu} \quad (3)$$

また、 $U_*(=\sqrt{\tau_0/\rho})$ は摩擦速度である。

(2) 底泥内部における吸脱着を伴う物質移動

底泥間隙水中の溶質濃度 C_{∞} は、仮定4)より平衡濃度で近似できる。この吸着平衡に関して、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た筆者らの吸着実験結果によると、カオリナイトとメチレンブルーの間の吸着平衡はLangmuir式(後述の式(7))で表現できる⁸⁾。これより、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することにする。

吸着平衡では吸着速度と脱着速度が等しいことから次式が成立する。

$$k_1 C_{-\infty} (1 - \theta) = k_2 \theta \quad (4)$$

ここに、 k_1 : 吸着速度定数、 k_2 : 脱着速度定数、 θ : 吸着サイトの充足率。なお、左辺は吸着速度であり、右辺は脱着速度である。

上式中の充足率 θ を吸着剤単位重量あたりの溶質の吸着量 q 、飽和吸着量 q_m を用いて次式のように表す。

$$\theta = \frac{q}{q_m} \quad (5)$$

式(4)より、平衡状態における吸着サイトの充足率 θ_e 、すなわち、平衡吸着量 q_e が求まる。

$$q_e = \frac{k_1 C_{-\infty} q_m}{k_1 C_{-\infty} + k_2} = \frac{k_1 / k_2 C_{-\infty} q_m}{k_1 / k_2 C_{-\infty} + 1} = \frac{b C_{-\infty} q_m}{b C_{-\infty} + 1} \quad (6)$$

一方、筆者らは溶質としてメチレンブルーを、吸着剤としてカオリナイトを用いて吸着実験を行い、次式を得た⁸⁾。

$$q_e = \frac{10.72 C_{-\infty}}{1 + 2.11 C_{-\infty}} \quad (7)$$

これより、

$$b = \frac{k_1}{k_2} = 2.11, \quad q_m = 5.08 [\text{mg} / \text{g}] \quad (8)$$

前述のように、本研究ではDOの濃度分布の測定例を参考に、底泥内部における溶質の濃度分布として、図-1に示すような界面近傍で濃度が急激に変化し、底泥内部へと向かうとともに間隙水濃度 C_{∞} に漸近するような分布を仮定する。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。

$$\phi D \frac{d^2 C}{dy^2} - k_1 C (1 - \frac{q}{q_m}) + k_2 \frac{q}{q_m} = 0 \quad (9)$$

ここに、 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 の関数として次式で表される。

$$\phi = \frac{1}{1 + \frac{100}{w G_s}} \quad (10)$$

境界条件は

$$y=0 \text{ において } C=C_w \quad (11, a)$$

$$y=-\infty \text{ において } C=C_{-\infty} \quad (11, b)$$

式(11, b)の底泥間隙水濃度 $C_{-\infty}$ は、次の推定式により含水比 w とメチレンブルー濃度(調整時) C_l の関数として与えられるものとする⁸⁾。

$$C_{-\infty} = \frac{-g(C_l, w) + \sqrt{\{g(C_l, w)\}^2 + 4.22 C_l}}{4.22} \quad (12)$$

ここに、

$$g(C_l, w) = 1 + \frac{1.07 \times 10^6}{w} - 2.11 C_l$$

式(9)を解けば、底泥内部での溶質の濃度分布が得られる。この式(9)を解くにあたり、 C および q を未知パラメータ ε を用いて ε のベキ級数に展開する。

$$C = C_0 + \varepsilon C_1 + \varepsilon^2 C_2 + \cdots \quad (13, a)$$

$$q = q_0 + \varepsilon q_1 + \varepsilon^2 q_2 + \cdots \quad (13, b)$$

式(13, a), (13, b)を式(9)に代入して、 ε のベキの係数を0とすると次式を得る。なお、ここでは ε は解析上、近似解の次数識別の目印と考えているので、最後の段階で $\varepsilon \rightarrow 1$ とする。また、後述のように式(13)の展開は、1次の項で打ち切ることとする。

$$\varepsilon^0: \phi D \frac{d^2 C_0}{dy^2} - k_1 C_0 (1 - \frac{q_0}{q_m}) + k_2 \frac{q_0}{q_m} = 0 \quad (14)$$

$$\varepsilon^1: \phi D \frac{d^2 C_1}{dy^2} - k_1 C_1 (1 - \frac{q_0}{q_m}) + (k_1 C_0 + k_2) \frac{q_1}{q_m} = 0 \quad (15)$$

まず、式(14)を式(11)の境界条件の下に解けば、吸着量 q が一定($q_0 = q_e$: 平衡吸着量)に保たれる場合の解が以下のように求まる。

$$C_0(y) = C_{-\infty} + (C_w - C_{-\infty}) e^{\lambda y} \quad (16)$$

ここに、

$$\lambda = \sqrt{\frac{k_1}{\phi D} (1 - \frac{q_e}{q_m})} \quad (17)$$

次に、吸着量 q の鉛直分布を考慮した場合の溶質濃度分布の近似解を求める。このとき、式(15)中の C_0 に関しては、式(16)を用いる。また、吸着量 q_1 の鉛直分布として次式を仮定する。

$$q_1(y) = (q_w - q_e) e^{\gamma y} \quad (18)$$

上式において、 q_w は界面での底泥粒子単位重量あたりの溶質の吸着量である。また、上式中の γ に関して、 γ^{-1} は吸着量 q が変化する鉛直方向の長さスケールであり、式(17)の λ と次式で関係づけられる。

$$\gamma = \alpha\lambda \quad (19)$$

ここに、 α は定数である。

以上のような仮定の下に式(15)を解けば、1次の摂動解 C_1 が以下のように得られる。

$$C_1(y) = -\frac{k_1/k_2 C_{-\infty} + 1}{k_1/k_2 (\alpha^2 - 1)} \cdot \frac{q_w/q_e - 1}{q_m/q_e - 1} e^{\gamma y} - \frac{C_w - C_{-\infty}}{\alpha(\alpha + 2)} \cdot \frac{q_w/q_e - 1}{q_m/q_e - 1} e^{(\gamma + \lambda)y} + \beta e^{\lambda y} \quad (20)$$

ここに、 β は定数である。

式(16)、(20)より底泥内部における溶質の濃度分布 $C(y)$ が求まる。

$$C(y) = C_0(y) + \varepsilon C_1(y) \\ = C_{-\infty} + \left[(C_w - C_{-\infty}) + \left\{ \frac{2.11C_{-\infty} + 1}{2.11(\alpha^2 - 1)} + \frac{C_w - C_{-\infty}}{\alpha(\alpha + 2)} \right\} Q_* \right] e^{\lambda y} - \frac{2.11C_{-\infty} + 1}{2.11(\alpha^2 - 1)} Q_* e^{\gamma y} - \frac{C_w - C_{-\infty}}{\alpha(\alpha + 2)} Q_* e^{(\gamma + \lambda)y} \quad (21)$$

上式の導出に際して、 $\varepsilon \rightarrow 1$ とした。さらに、式(8)の関係を用いて $k_1/k_2 = 2.11$ とした。また、 Q_* は次式で定義される無次元吸着パラメータである。

$$Q_* = \frac{q_w/q_e - 1}{q_m/q_e - 1} \quad (22)$$

上式(22)は界面での吸着量 q_w 、平衡吸着量 q_e 、飽和吸着量 q_m の関係を示すものである。このうち平衡吸着量は平衡濃度 $C_{-\infty}$ 、すなわち、底泥含水比 w およびメチレンブルー濃度(調整時) C_l によって決まる。他方、界面での吸着量は底泥単位体積中の底泥粒子の量、すなわち、含水比に関係すると考えられる。

底泥内部における溶質の濃度分布が得られたので、この式(21)より、水・底泥境界面での物質フラックス J を表す式が得られる。

$$J = -\phi D \frac{dC}{dy} \Big|_{y=0} = -\phi D \lambda (C_w - C_{-\infty}) + F \quad (23)$$

ここに、

$$F = \phi D \lambda Q_* \left\{ \frac{2.11C_{-\infty} + 1}{2.11(1 + \alpha)} + \frac{C_w - C_{-\infty}}{\alpha + 2} \right\}$$

(3) 溶出フラックスの定式化

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(23)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 を与える次式が得られる。

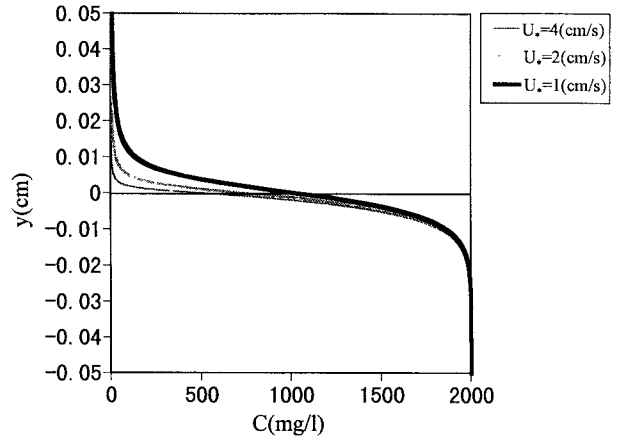


図-2(a) 溶質の濃度分布(底泥含水比一定)

$$J = \frac{\frac{3\sqrt{6}}{8\pi} nSc^{\frac{2}{3}} \sqrt{f} U}{1 + \frac{3\sqrt{6}}{8\pi} nSc^{\frac{2}{3}} \sqrt{f} \frac{U}{\phi D \lambda} \cdot \frac{\alpha + 2}{\alpha + 2 - Q_*}} [C_{-\infty} - C_{\infty} + \frac{\alpha + 2}{\alpha + 2 - Q_*} \cdot \frac{2.11C_{-\infty} + 1}{2.11(1 + \alpha)} Q_*] \quad (24)$$

また、界面での溶質濃度 C_w は次式で表される。

$$C_w = \frac{1}{1 - \frac{Q_*}{\alpha + 2} + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} nSc^{\frac{1}{3}} \frac{U_*}{\nu} \frac{1}{\phi \lambda}} \{ C_{-\infty} (1 - \frac{Q_*}{\alpha + 2}) + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} nSc^{\frac{1}{3}} \frac{U_*}{\nu} \frac{C_{\infty}}{\phi \lambda} + \frac{2.11C_{-\infty} + 1}{2.11(1 + \alpha)} Q_* \} \quad (25)$$

溶出フラックスは濃度境界層における物質移動と底泥内部での吸脱着を伴う物質移動の双方に規定されることを想起して、ここでは溶出フラックスに及ぼす上層流れの影響および底泥内部での吸脱着の影響について以下のような考察を行った。

図-2(a)は、底泥含水比を一定($w=200\%$)として摩擦速度を変化させた場合の溶質の濃度分布を示したものである。この際、界面濃度は式(25)より算定し、底泥内部および底泥上の濃度分布はそれぞれ式(2)、(21)より求めた。なお、無次元吸着パラメータ Q_* は後述(式(32))するように、含水比 w の関数としている。この図より、摩擦速度が大きくなる(流速が速くなる)ほど、界面直上で濃度が変化する領域(濃度境界層)が薄くなり、また界面濃度が低くなるのがわかる。一方、底泥内部では濃度が変化する深さはほぼ同じであるのが確認できる。

次に、摩擦速度を一定($U_* = 1 \text{ cm/s}$)とし、含水比 w を変化させた場合の濃度分布を図-2(b)に示す。この図より、界面直上の濃度境界層厚さはどの含水比でもほぼ同じであるが、含水比が高くなるほど界面濃度が高くなるのがわかる。また、底泥内部の濃度が変化する深さは、高含

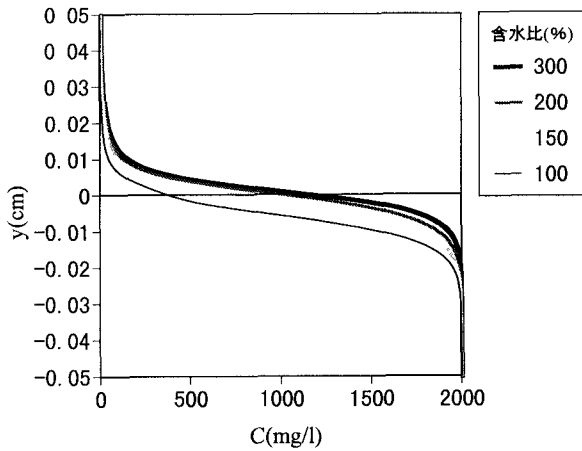


図-2(b) 溶質の濃度分布(摩擦速度一定)

水比の底泥ほど小さく、含水比が低くなるほど大きくなる傾向がある。これは、含水比が高い(底泥単位体積中の粒子数が少ない)底泥ほど物質移動に及ぼす底泥内部の吸脱着の影響は小さく、低含水比になるほど吸脱着の影響が大きくなることによるものと考えられる。

以上のように、摩擦速度および含水比の双方によって濃度分布や界面濃度が変化することがわかった。これは、界面を横切る物質フラックスは、直上の流れと底泥の物性の影響を受けて変化することを意味するものである。

3. 溶出フラックスの推定式

(1) 溶出フラックスの無次元表示

溶出フラックスの推定式(24)を、式(28)、(29)に示す無次元量を用いて変形すれば、式(27)で定義されるシャーウッド数 Sh (無次元化した溶出フラックス)が次式で表される。

$$Sh = \frac{\frac{3\sqrt{6}}{8\pi} nmSc^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{7}{8}}}{1 + \frac{3\sqrt{6}}{8\pi} nmSc^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{7}{8}} \lambda_* \frac{\alpha+2}{\alpha+2-Q_*}} \cdot \left[1 + \frac{\alpha+2}{\alpha+2-Q_*} \cdot \frac{2.11C_{-\infty}+1}{2.11(1+\alpha)(C_{-\infty}-C_{\infty})} Q_* \right] \quad (26)$$

ここに、

$$Sh = \frac{h_D R_H}{D} = \frac{J}{C_{-\infty} - C_{\infty}} \cdot \frac{R_H}{D} \quad (27)$$

$$Re = \frac{UR_H}{\nu} \quad (28)$$

$$\lambda_* = \frac{1}{R_H \lambda \phi} \quad (29)$$

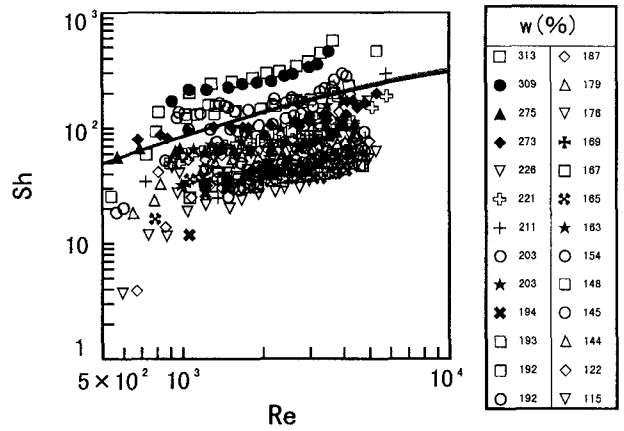


図-3 式(31)による溶出フラックスの推定値と実験値の比較

上式中の h_D 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(24)中の摩擦抵抗係数 f には、次のBlasiusの式を用いた。

$$f = 0.3164 \cdot (4Re)^{-\frac{1}{4}} \quad (30)$$

したがって、式(26)中の定数は $m=0.473$ である。

(2) 吸着量の鉛直分布を考慮しない場合の溶出フラックスの推定式

底泥内部での溶質の濃度分布の解析(2.)において、吸着量 $q(y)$ の鉛直分布を考慮せずに $q=q_e$ (底泥内部で一定)とすれば、濃度分布は式(16)で表される。この場合、溶出フラックスの推定式(26)は次式となる。

$$Sh = \frac{\frac{3\sqrt{6}}{8\pi} nmSc^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{7}{8}}}{1 + \frac{3\sqrt{6}}{8\pi} nmSc^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{7}{8}} \lambda_*} \quad (31)$$

上式によると、溶出フラックスは流れ場を表す Re 数、そして、 Sc 数および無次元パラメータ λ_* の関数として表現される。なお、 λ_* 中には含水比の関数である空隙率 ϕ が含まれる。

推定式(31)の妥当性を検証するために実験結果との比較を行う。図-3に推定式(31)による推定値を筆者らによる実験値⁸⁾と併せて示す。なお、 Sc 数は実験ケースごとに異なる値をとるが、この Sc 数の推定値への影響は僅かであるので⁸⁾、ここでは、実験ケースによって Sc 数を変化させずに、 $Sc=5000$ (一定値)とした。また、他の計算に必要なパラメータについて、式(29)中の空隙率 ϕ は式(10)より求めるが、その際、底泥粒子(カオリナイト)の比重は2.60とした。一方、 λ は式(17)で表されるが、この式中の飽和吸着量 q_m は式(8)で与えた。平衡吸着量 q_e は、実験ケースごとにその条件(C_e , w)から式(12)で C_{∞} を算定し、これより式(7)で q_e を求め、それらの平均値を用いた。

図-3より、推定値の含水比による差異は僅かであり、

推定式(31)は含水比による溶出フラックスの差異を再現できないことがわかった。すなわち、吸着量の鉛直分布を考慮せずに、溶質の濃度分布のみを考慮した式(16)は、底泥内部での吸脱着を伴う物質移動を十分には表現できないことが示された。そこで、以下では吸着量の鉛直分布を考慮した推定式(26)によって現象の再現を試みた。

(3) 底泥内部での吸脱着を伴う物質移動の影響を考慮した溶出フラックスの推定式

濃度境界層における物質移動および底泥内部での吸脱着を伴う物質移動の両者の影響を考慮して溶出現象をモデル化すると、溶出フラックスは前出の式(26)で与えられる。この式中には、底泥内部での吸脱着を伴う物質移動を表すパラメータ Q_s および λ_s が含まれる。このうち λ_s は上述のように含水比の関数である。一方、 Q_s は界面での吸着量 q_w 、平衡吸着量 q_e および飽和吸着量 q_m の関係を表すものであるが、 q_e と q_m が同じ場合、底泥単位体積中に粒子を多く含む(含水比の低い)底泥ほど q_w は小さく、含水比が高くなるほど q_w は大きくなると考えられる。そこで、式(22)中の q_w/q_e を次式のように含水比の関数として表現することにする。

$$\frac{q_w}{q_e} = 1 - e^{-Aw-B} \quad (32)$$

上式において $A=0.02$ 、 $B=5$ とした。

以上のように、無次元パラメータ Q_s 、 λ_s を含水比の関数とし、含水比 w を様々に変化させた場合の式(26)による推定値を実験値と併せて図-4に示す。

図-4によると、式(26)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、含水比が高くなるに伴いグラフの上側にシフトし、含水比による実験値の差異をうまく表現しているのがわかる。一部、高含水比の底泥を用いた実験値とはうまく対応していないが、これは底泥の巻き上げも影響していると思われる。しかし、この高含水比の底泥を用いた実験値を除けば、溶出フラックス推定式(26)による推定値は実験結果と概ね対応しており、この結果は本モデルの妥当性を示すものといえよう。

4. むすび

本研究では、底泥から流水への溶解性物質の溶出現象をモデル化して、溶出フラックスを直上水の流れ、底泥の物性および吸脱着を表すパラメータの関数として定式化した。水・底泥境界面近傍を、底泥直上の濃度境界層と底泥内部に分け、底泥内部での吸脱着を伴う物質移動の解析を行い、溶質の濃度分布および界面での物質フラックスを定式化するとともに、濃度境界層における物

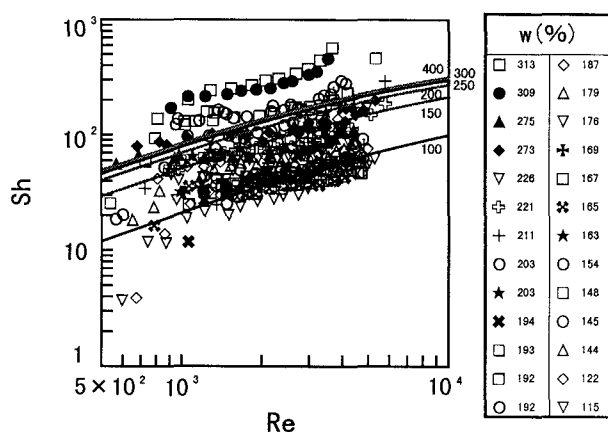


図-4 式(26)による溶出フラックスの推定値と実験値の比較
(図中の数字は含水比 w の値を示す)

質移動の解析結果と連立させて、溶出フラックスを推定するためのモデルを構築した。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、九州大学 中村由行 助教授から有益なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- Joergensen, B.B. and Revsbech, N.P. : Diffusive boundary layers and the oxygen uptake of sediment and detritus, *Limnology and Oceanography*, 30(1), pp.111-122, 1985.
- Joergensen, B.B. and D.J. Des Marais : Diffusive boundary layer of sediments : Oxygen microgradients over a microbial mat, *Limnology and Oceanography*, 35(6), pp.1343-1355, 1990.
- Rahm, L. and Svensson, U. : On the mass transfer properties of the benthic boundary layer with an application to oxygen fluxes, *Netherlands Journal of Sea Research*, 24(1), pp.27-35, 1989.
- 細井由彦, 村上仁士, 上月康則 : 底泥による酸素消費に関する研究, 土木学会論文集, No.456, pp.83-92, 1992.
- 中村由行 : 底質の酸素消費過程における濃度境界層の役割, 水環境学会誌, pp.732-741, 1993.
- 中村由行, 御子神 学, H.G. ステファン : 閉鎖性水域における底質の酸素消費速度-流れの影響のモデル化-, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.986-990, 1993.
- 中村由行, 井上徹教, Kerciku, F., 左山幹雄, 前田広人 : 微小酸素電極による水・堆積物界面近傍の濃度計測手法の開発, 第33回環境工学研究フォーラム講演集, pp.141-143, 1996.
- 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.

(1998. 9. 30受付)