

流れ場における水・底泥間の溶出現象のモデル化と検証実験

広島県 正会員○榎川稔也 呉工業高等専門学校 正会員 黒川岳司
豊橋技術科学大学 学生会員 井丸知恵

1. はじめに

閉鎖性水域での富栄養化を考える上では、水・底泥間での物質移動現象を定量的に把握することが重要な課題である。著者ら¹⁾は底泥上の流れの影響によって起こる溶解性物質の移動量の変化に加え、底泥内部の濃度低下と濃度勾配の形成を考慮したモデルを構築した。そして、単純化した条件下での溶出実験を行い、モデルの妥当性を検証した。しかし、実験システムの特長や実験条件の設定により溶出現象に差異が出てくる可能性がある。そこで、本研究では溶出現象が実験条件に依存しないことを明らかにするとともに、溶出モデルに対する実証性を高めることを目的とする。

2. 溶出現象のモデル化

図1は水・底泥間の溶出と濃度分布の関係を示したものである。溶出現象のモデル化は界面近傍を底泥直上の部分と、底泥内部の二つの部分に分けて考える。まず、底泥直上部分を考える。図1に示すように、底泥上流速が増加すると、濃度勾配が大きくなり、溶出フラックスが増加することがわかっている²⁾。そこで、水理学的滑面として、①定常状態、②乱流場、③固定床を対象とし、底泥の流動や巻き上げは考慮しないなどの仮定の下で解析した。また、境界条件は $y=0$ （水・底泥界面）において $C=C_w$ 、 $y=\infty$ （水面）において $C=C_\infty$ である。ここに、 C_w は界面での物質濃度、 C_∞ は主流中の物質濃度である。次に、物質移動を表す無次元数としてシュミット数 Sc 、乱流シュミット数 Sc_t を用いる。本研究では、濃度境界層と速度境界層の厚さが等しいと仮定し、 $Sc_t=1$ とする²⁾。以上より、溶出フラックス F は、摩擦速度 U_* 、界面と上層水との間の物質濃度差 $(C_\infty-C_w)$ 、シュミット数 Sc の関数として次式が導かれる¹⁾。

$$F = \frac{-5.485 \times 10^{-3} \cdot U_* (C_\infty - C_w)}{Sc^{2/3}} \quad (1)$$

次に、底泥内部のモデルを構築する。底泥内部では溶出現象が進むにつれて、濃度勾配が形成され濃度低下が起こる。そのため溶出フラックスが減少していく。 t 時間に上層水中に移動した底泥間隙水と同量の上層水が底泥に移動すると仮定し、 t 時間後における底泥間隙水の平均の物質濃度を C_w' とする。また、底泥内部の溶解性物質は水・底泥界面に近いほど移動量が多いので、底泥内部濃度 C は図1のように、底泥深さ方向に分布を形成することになる。その分布を表す関数を次式とする。

$$C = f(y) = -ay^{1/k} + b \quad (k \text{ は任意の係数}) \quad (2)$$

境界条件として、 $y=h$ （底泥内部の最深部）では、溶解性物質濃度は変化せず、 $C=C_0$ とすると、界面での溶解性物質濃度 C_w は C_w' と C_0 を用いて表すと次式のようなになる。

$$C_w = (k+1) \cdot C_w' - k \cdot C_0 \quad (3)$$

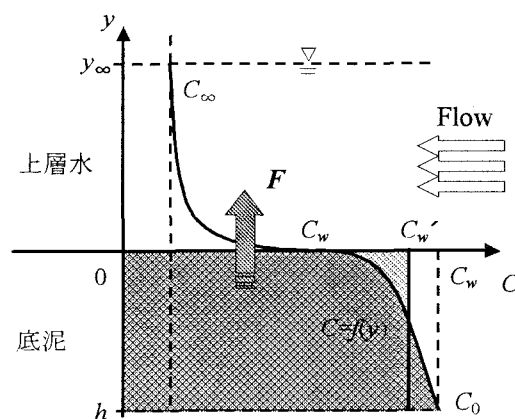


図1 水・底泥間の溶出と濃度分布の関係

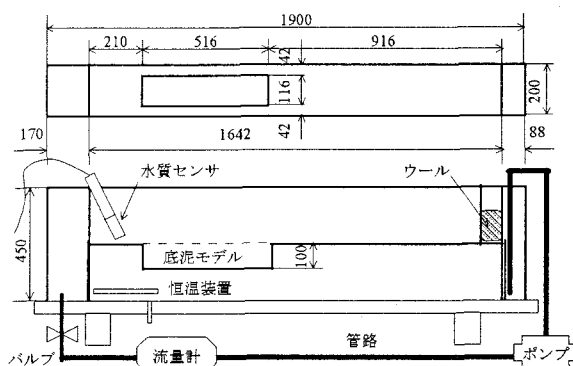


図2 実験装置の概略（単位：mm）

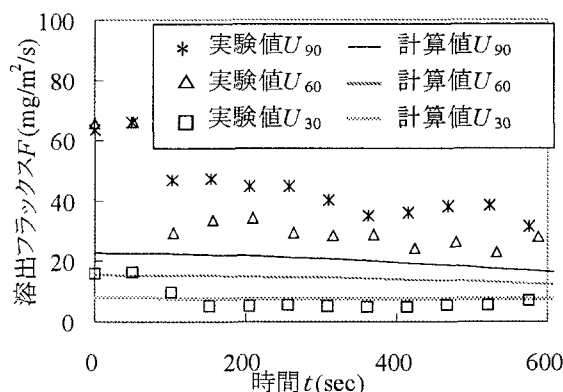


図3 各流速の実験値と計算値の経時変化（前）

3. 溶出実験

実験装置の概略を図3に示す。実験装置は循環水路法を適用した。水路床中央部には底泥試料を敷き詰めることができる窪み部分を設けた。溶出モデルの仮定に適合するように、底泥材料にガラス製ビーズ（粒径 5mm）を用いた。溶質には NaCl 溶液（0.1mol/l, 1mol/l の 2 種類）を使用した。流れは循環ポンプにより起こし、バルブの開閉によって、任意の流速に調節できる。本実験では 3 種類の流速（摩擦速度 $U_{90}=5.5\text{mm/s}$, $U_{60}=3.9\text{mm/s}$, $U_{30}=3.0\text{mm/s}$ ）で行った。また、次式から溶出フラックス F ($\text{mg/m}^2/\text{s}$) の実験値を求めた。

$$F = \frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (4)$$

ただし、 V は開水路を循環する水の体積、 A は窪み部分の表面積、 dC/dt は濃度の時間変化率である。

また、本実験システムの溶出現象の再現性の向上のため、以下の 3 点について改良を行った。

- ①図2に示すように、実験装置の上流側の水路床上に整流板を設け、その間にウールを詰め、流れをより安定させた。
- ②従来の実験¹⁾では、底泥モデルに凹凸があり、それ以外の水路床上は平面であるといった形状の違いによる影響が考えられた。そのため水路床上にもガラス製ビーズ（粒径 8mm）を敷き詰め、水路床材料を均一にした。
- ③溶質に NaCl 溶液を用いることによって、密度差の影響が考えられた。そのため、溶質に硝酸イオン溶液（以下、 NO_3^- 溶液）0.1mol/l, 1mol/l の 2 種類も用いた。

4. 実験システムの検証

NaCl 溶液 1mol/l, 実験装置改良前と改良後の各流速での計算値 ($k=3$) と実験値の経時変化をそれぞれ図3, 4に示す。図3, 4より、底泥上の流速が大きくなると底泥からの溶出フラックスも大きくなり、装置改良後は装置改良前より溶出現象の再現性が高くなった。これより、改良後の実験システムにおいても流れによって起こる溶出現象を再現することが可能であると考えられる。また、各流速の実験値と計算値は実験初期を除き、ほぼ同様の傾向を示している。これより、仮定した底泥内部の濃度勾配を考慮したモデル式は適当であると考えられる。また、実験装置改良前では計算値と実験値には溶出フラックスに大きな差が現れているが、改良後では底泥内部の計算値と実験値は実験初期を除き、溶出フラックスに大きな差はない。これは実験装置の改良により流れが均一になったためと考えられる。これより、改良後の実験システムは改良前よりも再現性が向上した。以上より、本研究で構築したモデル式は、実際の溶出現象をおおむね再現できるものと考えられる。

図5は摩擦速度 U_{60} , NaCl 溶液, NO_3^- 溶液, とともに 0.1mol/l を用いたときの実験値の経時変化を示したものである。実験値は実験初期を除き、ほぼ同程度の溶出フラックスとなっていることから、溶質の違いによる影響は小さいと考えられる。これより、溶質を変化させても、本研究のモデル式は実際の溶出現象を再現できると考えられる。

5. まとめ

本研究では、流れ場における水・底泥間の溶出現象について、モデルを構築し、検証実験を試みた。その結果を以下にまとめる。(1) 溶出実験を行い、溶出フラックスが流速の増加にともなって増加することを実証できた。(2) 底泥内部の濃度勾配を考慮した溶出フラックスと流速の関係を表すモデル式は、検証実験によって溶出現象をおおむね再現することを証明できた。(3) 溶質を変化させても、本研究のモデル式は実際の溶出現象を再現できる。

参考文献 1) 黒川ら：流れ場における水・底泥間の溶解性物質の移動現象に関する研究, 平成 16 年土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.125-126, 2004.

2) 東野ら：一方向流れ場における底泥からの上層水への溶解性物質の溶出過程, 土木学会論文集 No.621/II-47, pp.167-177, 1999.

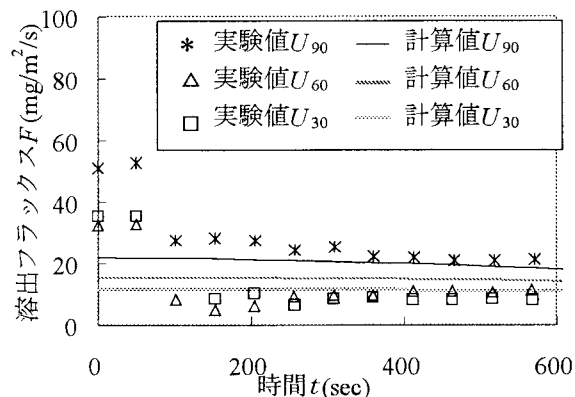


図4 各流速の実験値と計算値の経時変化（後）

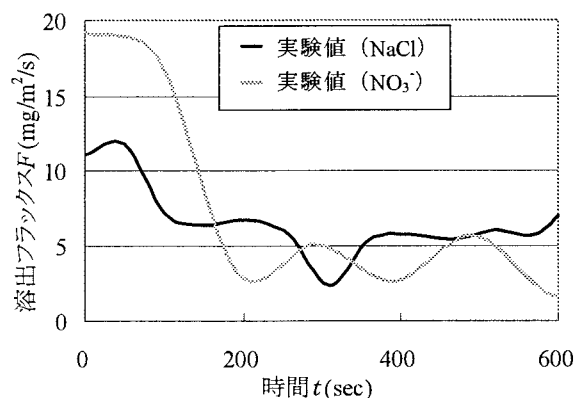


図5 溶質の違いによる比較