

流れ場における底泥からの溶解性物質の溶出に関する基礎的研究

呉工業高等専門学校専攻科 学生会員○榎川稔也

呉工業高等専門学校

正会員 黒川岳司

呉工業高等専門学校専攻科 学生会員 志和充将

1. はじめに

閉鎖性の強い水域における富栄養化を考える上では、底泥からの内部負荷の正確な評価が必要である。つまり、水・堆積間での物質輸送過程を定量的に把握することが非常に重要な課題である。本研究では、底泥の物性の影響として、生物・化学的作用や堆積物粒子間の吸脱着の作用は働かないものと想定し、底泥上の流れの影響によって起こる溶解性物質の輸送量の変化を示すモデル化を構築する。そして、単純化した条件下での実験によりそのモデルを立証する。

2. 溶出現象のモデル化

図1は溶解性物質の濃度と流速の関係を示したものである。溶出現象を表す式は、溶出フラックス F と溶解性物質濃度 C との関係により次式で表される。

$$F = -(D_m + D_l) \frac{dC}{dy} \quad (1)$$

ここに、 D_m ：溶解性物質の分子拡散係数

D_l ：溶解性物質の乱流拡散係数

(1)式では溶出フラックスは濃度勾配に比例するが、流速の影響が考慮されていない。図1に示すように、流れ場では濃度境界層の厚さは上層水流速の増加とともに薄くなる。そのため濃度勾配が大きくなり、溶出フラックスは増加することがわかっている。従って、流速を考慮したモデル式を構築する必要がある。そこで、水理学的滑面として(1)式を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を元に解析した。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_∞ は界面から十分離れた上方の位置における物質濃度（主流中の物質濃度）である。動粘性係数を ν 、滑動粘性係数を ν_l として、シュミット数 $Sc (= \nu/D_m)$ 、乱流シュミット数 $Sc_l (= \nu_l/D_l)$ 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、 $Sc_l=1$ とする¹⁾。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。

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

(2)式より溶出フラックス F は、界面と上層水との物質濃度差 $C_\infty - C_w$ に比例し、また、流速（摩擦速度 U_* ）が大きくなるほど F が増大することがわかる。図2は(2)式の関係を図示したものである。これより、フラックスと濃度差とフラックス量がほぼ比例関係となる。

3. 溶出モデルの検証実験

本研究の実験において、計測するものは主に流速、導電率および水温である。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。底泥のモデルには底泥材料としてガラス製ビーズ（粒径5mm）を用い、溶質にはNaCl溶液（0.1mol/lおよび1mol/lの2種類）を使用した。NaCl溶液を使用する理由は分子拡散係数などの物理特性が既知であることと、水質センサによって導電率の

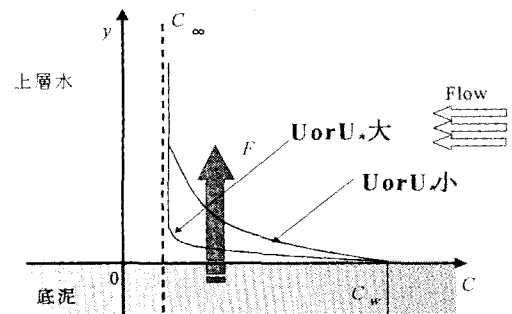


図1 溶解性物質の濃度と流速の関係

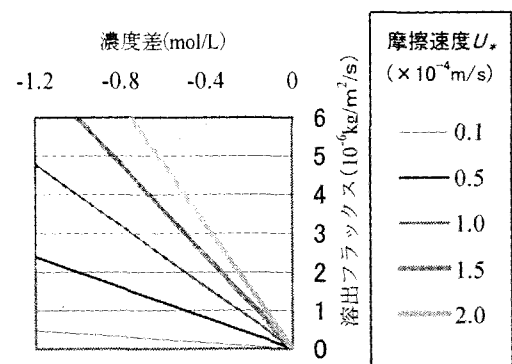


図2 濃度差と溶出フラックスの関係

測定から濃度が容易に知ることができるためである。NaCl 溶液は純水と比べると密度が大きいので、窪み部分に NaCl 溶液を用い、水路床上部に純水を用いると密度差による影響が生じ、そこで恒温器によって上層 (15℃) と下層 (33℃) を異なる水温に保つことで密度が均一になるように密度調整することにした。流れは循環ポンプにより起こし、バルブの開閉によって、任意の流量に調節した。また、実験準備中に溶質が上層に漏れることを防ぐため、アクリル製の筒状の蓋を設け、測定開始時にこれをスライドさせてははずすことをした。次式から溶出フラックス F ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$) の実験値を求めた。

$$F \cdot A = V \cdot \frac{dC}{dt} \quad (3)$$

ただし、 V は開水路中に流れる水の体積、 A は窪み部分の表面積、 dC/dt は濃度の時間変化率である。

4. 結果と考察

図 4 は、各流速(流量)での (2) 式から算出した濃度差とフラックスの関係を表しており、また、(3) 式から算出した実験値を加えたものである。ここでの溶出フラックスは、実験期間における平均値を表している。図 4 に示すように、本実験においても、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った。これより本実験で用いた実験システムは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。図 4 より、理論値より実験値のほうがどの流量に小さい。これは、溶出モデルでは底泥内の濃度 C_w は一定としているが、本実験では溶出現象がすすむにつれて、底泥内部で濃度勾配が生じたためと考えられる。この現象は、溶質をインクで着色した実験においても確認できた。図 5 は、NaCl 溶液 1 mol/l、流量 40 l/min の時の溶出フラックスの経時変化である。実験初期に、理論値に近い溶出フラックスであるが、時間経過とともに、フラックスが低下している。したがって、界面付近のみの溶質が溶出したことで、上層水と界面での濃度差が小さくなり、フラックスが低下したと推測される。これらのことを考慮すると (2) 式で表される滑面のモデル式はおおむね妥当であると考えられる。

5. おわりに

本研究では流れ場における底泥からの溶出について、モデルの構築および実験による検証を試みた。その結果、(1) 単純な条件下において、溶出フラックスと流速との関係式を求めた。(2) 流れ場における溶出現象を再現することが可能な実験システムを製作した。

また、今後の課題は次のことがあげられる。(1) 水理学的滑面の底泥部分における濃度勾配を考慮したモデルを再構築する。(2) 水理学的粗面でのモデルを構築する。

参考文献 1) 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.

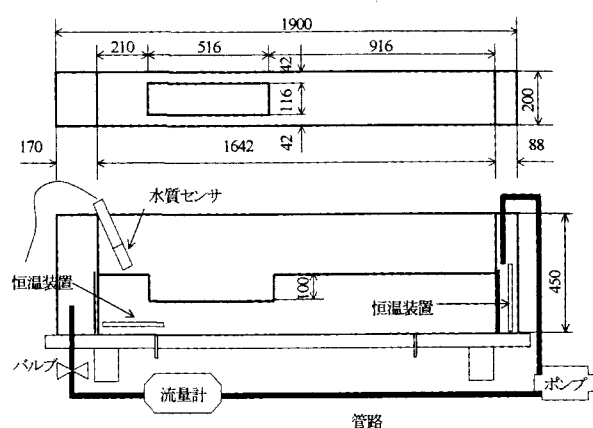


図 3 実験装置の概略 (単位: mm)

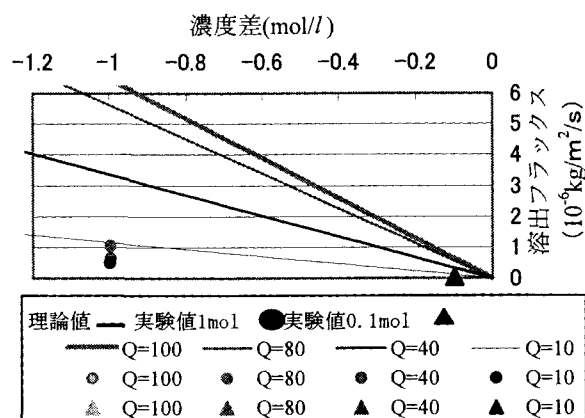


図 4 理論値と実験値の溶出フラックス

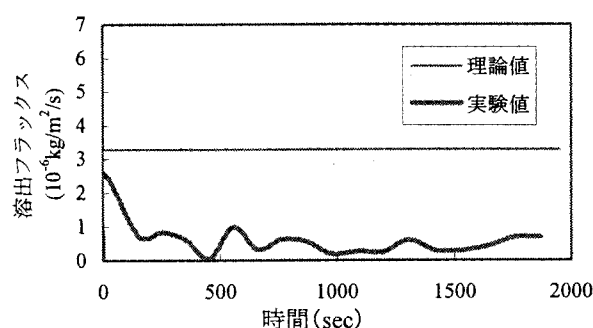


図 5 流量 40(l/min)での理論値，実験値の経時変化