

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

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 寺田聖子 呉工業高等専門学校専攻科 学生会員 古本幸彦

1. はじめに

閉鎖性の強い水域において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⁾は流速の変化による溶出フラックスの変化を表すモデルを構築した。しかし、検証実験では溶出現象がすすむにつれて、底泥内部の濃度勾配の影響によって溶出フラックスが減少していた。そこで、本研究では、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の改良を試みる。そして、単純化した条件下での実験によりそのモデルを検証する。

2. 水・底泥間の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。図1に示すように、流れ場では底泥上流速が増加すると、濃度勾配が大きくなる。そのため、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元で解析した。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。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⁾。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。

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

(1)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、摩擦速度 U_* が大きくなるほど溶出フラックスも増大することがわかる。しかし、このモデルでは底泥内部の濃度分布は一様に分布し、時間的に変化しないとしている。そこで、底泥内部の濃度分布の形成を考慮する。

図2は底泥内部の濃度分布のモデルを示している。この濃度分布を直接計測することは非常に困難である。そこで、本研究では、 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 C_w' を導く。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ことがわかっている。したがって、底泥内部濃度 C は図2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。

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

また、境界条件として $y=0$ では界面での溶解性物質濃度 C_w 、

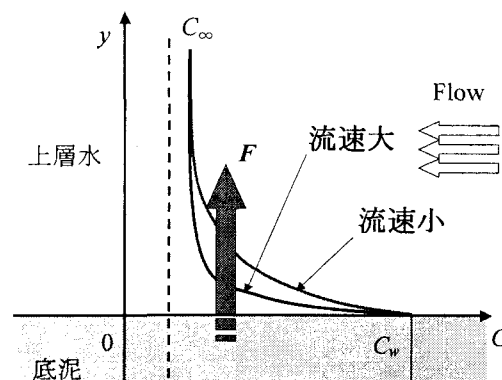


図1 溶解性物質の濃度と流速の関係

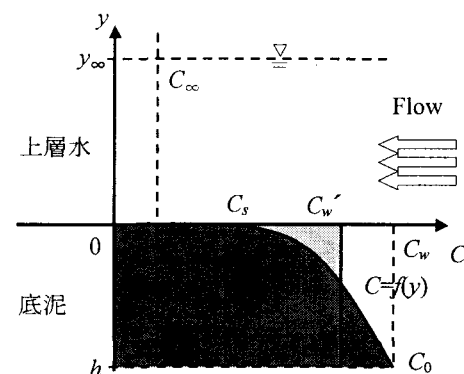


図2 底泥内部の濃度分布

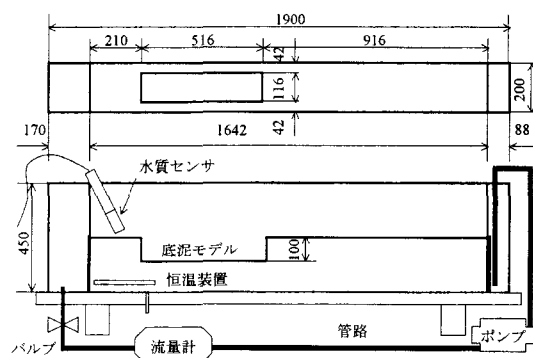


図3 実験装置の概略（単位:mm）

とし、 $y=h$ (底泥の深さ) では底泥内部の最深部の溶解性物質濃度 C_0 である。このとき、底泥最深部では溶解性物質濃度の変化がないとすると、 C_0 は $t=0$ のとき C_w と等しい。界面での溶解性物質濃度 C_s は C_w' と C_0 を用いて表すと次式ようになる。

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

ここで、 C_s は C_w' を含むので時間的に変化することがわかる。また、(1) 式中の C_w は (3) 式の C_s と同じ界面での溶解性物質濃度を表しているので C_s と C_w は等しくなり、置き換えることができる。

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。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測定から濃度が容易に知ることができるためである。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 5 種類の流速 (摩擦速度 $U_{90}=7.8\text{mm/s}$, $U_{75}=5.7\text{mm/s}$, $U_{60}=5.2\text{mm/s}$, $U_{45}=4.9\text{mm/s}$, $U_{30}=2.0\text{mm/s}$) 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。

4. 溶出モデルの検証

図 4 は NaCl 溶液 1mol/l のときの各流速での実験値および (1) 式より算出した計算値の経時変化を示している。図 4 より、計算値は実験値とほぼ近似しているが、実験値が緩やかな減少傾向を示しているのに対し、計算値はわずかに減少しているだけでほぼ一定となっている。これは 2. で述べたように、溶出モデルでは底泥内部の溶解性物質濃度 C_w は一様で、時間的に変化しないとしているが、本実験では溶出現象が進むにつれて、底泥内部で濃度勾配が生じたためと推測される。この現象は溶質をインクで着色した実験において確認できた。そこで底泥内部濃度 C_s を (3) 式を用いて溶出モデルの再検討を行う。

図 5 は NaCl 溶液 1mol/l, 摩擦速度 U_{90} ($=7.8\text{mm/s}$) のときの実験値と (3) 式中の k に任意の係数をそれぞれ代入し、算出した計算値の経時変化を示している。図 5 より、実験値と (3) 式から求めた計算値はほぼ同様の減少傾向を示している。しかし、底泥内部の濃度勾配を考慮した各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。この原因として、本研究の溶出モデルは滑面と仮定し、本実験システムでは滑面を再現することは困難なため、粗面で行っていることが挙げられる。溶出フラックスは滑面より粗面のほうが数倍増加することがわかっている³⁾。これらを考慮すると、本研究の (1) 式、(3) 式で表せられる水理学的滑面のモデル式は適当であると考えられる。

5. おわりに

本研究では水・底泥界面における溶解性物質の移動現象について、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) 水・底泥界面間での溶出現象において、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式を求めた。(2) 検証実験を粗面で行ったことを考慮すると、本研究の (1) 式、(3) 式で表せられる水理学的滑面のモデル式はおおむね妥当であると考えられる。

参考文献 1) 黒川ら：流れ場における底泥からの溶解性物質の溶出現象に関する基礎的研究，平成 15 年土木学会中国支部研究発表会発表概要集/II-55, pp.185-186, 2003.

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.

3) 中村ら：水・底泥界面での物質移動速度に及ぼす底面粗度の影響，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.1081-1085, 2000.

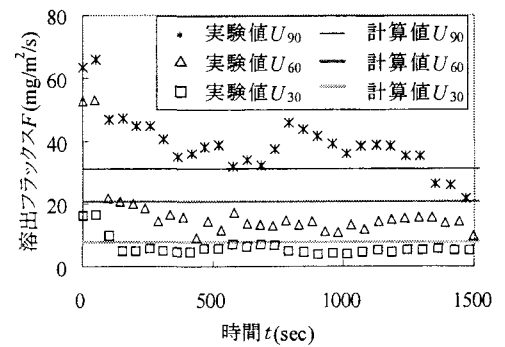


図 4 各流速での実験値と計算値の比較

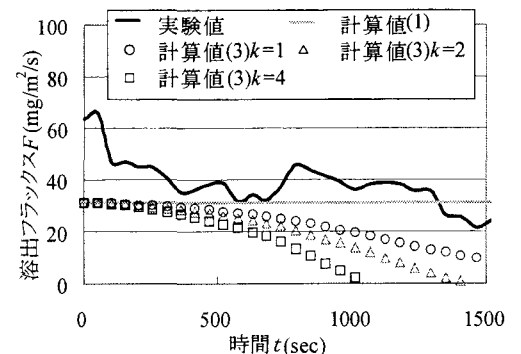


図 5 実験値と各計算値の経時変化