

開水路凹部流れにおける底泥から直上水への溶質の移動について

大分高専 正会員○東野 誠
神戸大学工学部 正会員 神田 徹

1. はじめに

筆者らは、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を水・底泥間での溶質の移動に起因する水質汚濁というようにとらえ、このような溶質の移動過程に関して水理学的滑面、および棧粗面を対象として理論的・実験的に検討してきた^{1), 2)}。ところで、実水域では様々な要因によって、底面に凹凸が存在する。このうち、凹部には有機物、栄養塩等を多量に含んだ底泥が堆積し、この底泥から直上の中へと溶質が移動することによって水域の水質に重大な影響を及ぼすことが懸念される。そこで、本研究では、水路床凹部に堆積した底泥中の溶質が直上水中へと溶出する場合を想定し、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、一方向流れの条件で凹部の深さを变化させた溶出実験を行い、凹部の形状(深さ)および凹部直上の水流速が溶出フラックスに及ぼす影響を調べた。

2. 開水路凹部流れにおける溶出過程

開水路凹部(トレンチ)流れは凹部の形状に応じて流れの形態が変化する。本研究では、流れの構造について検討が行われている図-1, 2 のような流れ場を対象とする。図-1 に示すように、凹部流れは段落ち部と段上がり部が組合わさった複合流れであり、開水路流れにおける代表的な局所流の 1 つである。段落ち部直下流では流線の剥離、再付着に伴って再循環領域が形成されるが、そこで生成された剥離渦は段上がり部における流線急縮の影響を受け変形しながら流下する。また、凹部形状によっては、図-2 のように流線の再付着は生じず、かわりに大規模な循環を伴うキャビティ的な流れが現れる。長方形断面開水路(幅 20cm)を用いて行われた開水路凹部流れ(トレンチ流下方向長さ $L=20\text{cm}$)に関する実験結果³⁾によると、トレンチ深さ $d=4\text{cm}$ で再付着を伴う流れからキャビティ流れへと遷移する。

3. 溶出実験

開水路凹部流れにおける、底泥から流水への溶質の溶出に関する基礎実験を図-3 のような長さ 700cm, 幅 20cm, 側壁高さ 20cm の長方形断面アクリル樹脂製開水路で行った。この水路の上流端より約 5m の位置に長さ 20cm, 深さ 10cm の凹部を設置して、この凹部にカオリナイトとメチレンブルー水溶液を用いて適当な含水比に調整した底泥を所定の深さに敷き、通水した。各流速ごとに水路下流端でサンプルを採水し、光電分光光度計により吸光度を測定する。予め求めておいた濃度と吸光度の関係式よりサンプル中のメチレンブルー濃度を算定し、次式によって溶出フラックスを求めた。

$$J = QC / A \quad (1)$$

ここに、 J : 溶出フラックス, Q : 流量, C : 採水したサンプル中のメチレンブルー濃度, A : 底泥床部の面積($=0.04\text{m}^2$)。

本研究においては、前述のように流れ場の影響に焦点を絞って検討を行うこととする。したがって、物性がほぼ一定(含水比 $w \approx 150\%$, メチレンブルー濃度(調整時) $C_i=15000\text{mg/l}$)の底泥を用い、この底泥を敷き詰める量を調整することでトレンチ深さ d を $0 \sim 8\text{cm}$ の間で変化させて溶出実験を行った。また、溶出に及ぼす凹部直上の流速の影響を調べるために、各実験において流速を変化させた。

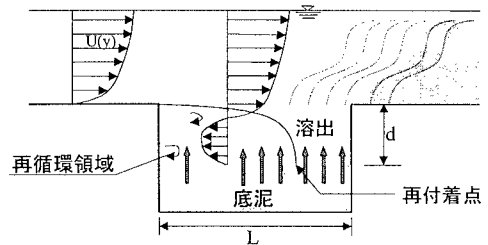


図-1 開水路凹部における流れと溶出現象(再付着有り)

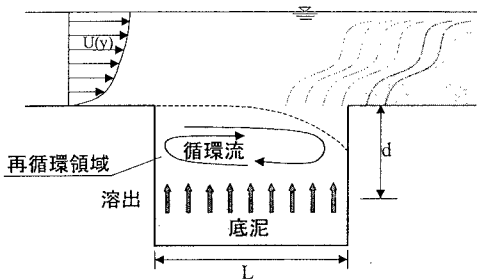


図-2 開水路凹部における流れと溶出現象(再付着無し)

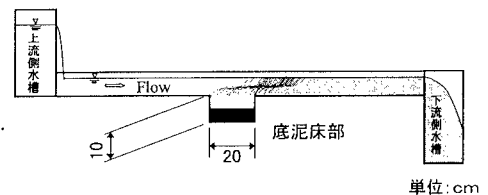


図-3 実験水路

4. 開水路凹部流れにおける溶出特性

実施した溶出実験による溶出フラックス J とトレンチ流入平均流速 U との関係を、トレンチ深さごとにシンボルを変えて図-4 に示す。この図より、トレンチ深さが小さいほど上方にプロットが並ぶのが見て取れる。また、トレンチが浅い場合 ($d=1\sim 4\text{cm}$) と深い場合 ($d=5\text{cm}$ 以上) とで明瞭な差異が見られる。すなわち、トレンチ深さが $1\sim 4\text{cm}$ では、流速とともにフラックスは増加することが明らかである。一方、 $d=5\text{cm}$ 以上では、プロットは急激に下方へとシフトするとともに、流速の増加に対する溶出フラックスの増加率(図中の勾配)が緩やかになる。

トレンチ深さによる溶出特性の変化は、トレンチ形状の変化に伴う流れの形態変化に起因するものである。すなわち、トレンチ深さ $d=1\sim 3\text{cm}$ の場合は再付着を伴う流れ(図-1)であり、 $d=4\text{cm}$ でキャビティー流れ(図-2)へと遷移する³⁾。また、 5cm 以上のトレンチ深さでは完全なキャビティー流れとなる。水・底泥間の溶質の移動フラックスは、底泥表面に接している水塊が上層水と混合交換を行う頻度で決まる。トレンチが浅い場合、トレンチ直上の流速とともにこの混合交換の頻度が増加するので溶出フラックスが増加すると考えられる。一方、トレンチ深さが大きい($d=5\text{cm}$ 以上)場合、トレンチ直上の流速が大きくなれば循環流の速度も大きくなり、トレンチー主流間の水塊の交換は活発になるが、上述の底泥表面と接している水塊がその上層の水塊と混合交換を行う頻度は流れが再付着する場合ほど増加しないので、溶出フラックスの流速依存性が小さくなるものと推察される。

5. 溶出フラックスの推定

開水路凹部流れにおける水・底泥間での溶質の移動現象を、前述のような流れの形態(図-1, 2)と物質移動との関係に着目して定式化すれば、次のようである。

$$Sh = \frac{3\sqrt{6}}{8\pi} nm Sc^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{7}{8}} e^{-\beta \frac{d}{L}} + \alpha \sqrt{Re Sc} \frac{R_H}{d} (1 - e^{-\beta \frac{d}{L}}) \quad (2)$$

ここに、

$$Sh = \frac{J}{C_{\infty} - C_0} \cdot \frac{R_H}{D}, \quad Re = \frac{UR_H}{\nu} \quad (3)$$

上式において、 U : トレンチ流入平均流速、 C_{∞} : 主流中の溶質濃度、 $Sc(=\nu/D)$: シュミット数、 ν : 動粘性係数、 D : 物質の分子拡散係数、 R_H : 径深、 $n(=0.1)$ 、 $m(=0.473)$ 、 $\beta(=20)$ 、 α : 定数である。

一方、(3)式中の C_{∞} は底泥間隙水中のメチレンブルー濃度であり、底泥含水比 w とメチレンブルー濃度(調整時) C_i の関数として次式で与えられる¹⁾。

$$C_{\infty} = \frac{-g(C_i, w) + \sqrt{\{g(C_i, w)\}^2 + 4.22C_i}}{4.22}, \quad g(C_i, w) = 1 + \frac{1.072 \times 10^6}{w} - 2.11C_i \quad (4)$$

図-5 は実験値のプロットと、(2)式でモデル定数を $\alpha=0.01$ として得られる $Sh \sim Re$ 関係曲線とを併示したものである。この図より、推定式はトレンチ深さとともにグラフの傾き(Re 数に対する Sh 数の増加率)をそれほど変化させることなく下方へとシフトするような値を与える。また、 $d=5\text{cm}$ 以上ではグラフの傾きは実験値と推定値ではほぼ同程度である。一方、 $d=4\text{cm}$ 以下では推定値はどのトレンチ深さにおいてもほぼ平行であるのに対し、実験値は推定値よりもグラフの傾きが大きく、推定式は実験結果を再現できない。したがって、上述のような流れの形態と溶出との関係についてより詳細に検討を行い、推定式の中に組み込む必要がある。

参考文献

- 1) 東野 誠, 神田 徹: 一方向流れ場における底泥から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.
- 2) 東野 誠, 神田 徹: 棧粗面における底泥から流水への物質移動, 水工学論文集, 第43巻, pp.773-778, 1999.
- 3) 藤田 一郎, 神田 徹, 門脇正夫, 森田卓光: 開水路凹部流れの PIV および LES による乱流解析, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp.79-88, 1996.

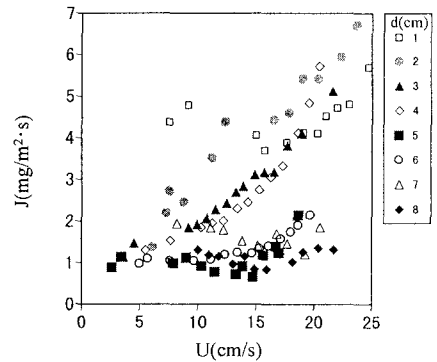


図-4 溶出フラックスと流速の関係

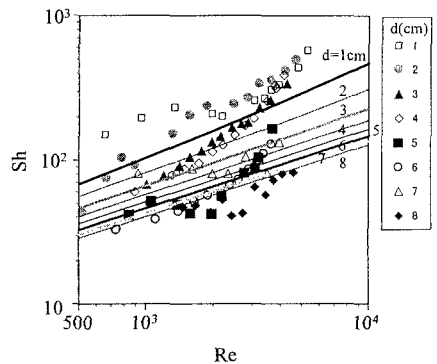


図-5 溶出フラックス推定値と実験値の比較