

Ⅱ-451

底泥の酸素消費速度に及ぼす底面粗度の影響

九大・工 正 員 中村 由行

学生員 柳町 武志

学生員 井上 徹教

1. 研究の目的 河川、湖沼及び海洋の水・底泥界面は様々な物質交換の場となっており、そこでの物質移動速度を把握する事は、水質管理上或いは生態系の理解のために重要である。著者らは、境界層理論を応用して、直上水の流れが底質の酸素消費速度及びリンの溶出フラックスに及ぼす影響を理論的に解析してきた¹⁾²⁾。これらはいずれも底面が滑面の条件を対象としている。しかしながら、粗面の場合には、熱や物質のフラックスが数倍増加する事が伝熱工学や化学工学の分野で知られている。従って、実水域でも同様な効果が予想されるが、粗度の影響を考慮した研究はきわめて少ない。そこで、本研究では、底質による酸素消費速度を例に、実験的及び理論的に粗度が物質輸送フラックスに及ぼす影響を調べる事を目的とする。

2. 研究内容 **2-1. 室内実験** 長さ2.5m、幅25cm、高さ15cmの矩形断面の循環式管水路を用いて実験を行った。実験装置を図-1に示す。水路の一部に窪みをつけ、底泥を長さ1.0m、深さ10cmに敷き詰める事ができる。本実験では、福岡市内の都市河川、宇美川下流部から採取した底泥を用いた。循環水の溶存酸素濃度はDOメータ（TOA-25A）によりモニタリングし、適当な時間間隔で循環水をサンプリングしてSS、水の酸素消費速度（BOD）、リン濃度を測定した。全実験条件を通じて、水温は30℃、暗条件とした。巻き上げが起こらない範囲で流速を変化させ、レーザ流速計により平均流速分布を計測し、摩擦速度を求めた。用いた底泥及び流速条件では底泥表面は全て滑面の条件であった。したがって、粗度の大きさを積極的に変化させるために、3mm角及び5mm角の亚克力棒を人工粗度として底面上に敷き詰めた。粗度要素間の距離はいずれも5cmである。

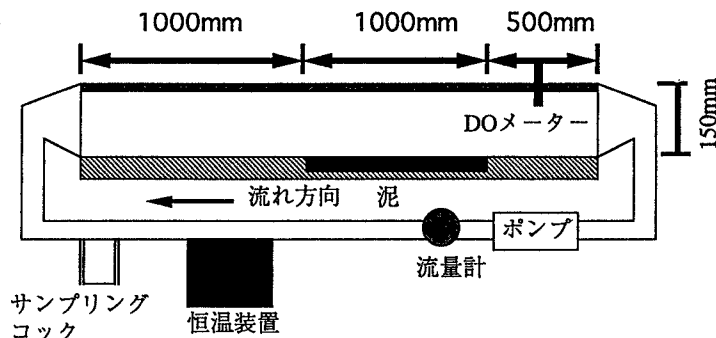


図1 実験装置概略図

DO濃度の時系列変化の一例を図-2に示す。DO濃度の時間変化率から循環水自体の酸素消費速度を補正後、底質の酸素消費速度（SOD）を求めた。いずれの実験も開始後6時間程度までは濃度変化率のばらつきが大きい、以後安定して変化した。従って、結果の整理と解析には6時間経過後の実験値を用いた。実験結果を著者ら³⁾による滑面でのフラックス推定式

$$J_+ = J / u_* (C_{\infty} - C_{bed}) = 0.0645 S_c^{-2/3} \quad (1)$$

及びDade⁴⁾による式と比較すると、同じシュミット数（ $Sc = \nu / D$ 、 ν は動粘性係数、 D は分子拡散係数）の条件でもフラックスが3倍程度大きくなる事がわかった。但し、 u_* は摩擦速度、 C_{bed}

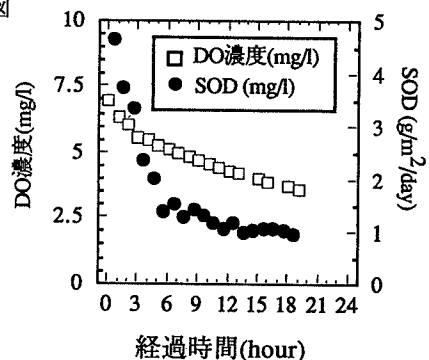


図2 実験結果の一例

は底面での濃度を表す。この結果を図-3に示す。

2-2. 理論 定常状態で水平方向に現象は一様であり、境界層内での物質の反応が無視できるものとすれば物質のフラックス J は鉛直方向にも一定である。従って、基礎式は以下のよう書ける。

$$J = -(D + \nu_t) \frac{dC}{dz} = \text{const.} \quad (2)$$

ここで、 ν_t は渦動粘性係数、 C は物質の濃度である。式(2)を変形し、平均流速が0となる点 $z=z_0$ よりも上方と下方の二つの領域にわけて積分し、整理すると(3)式が得られる。

$$J_+^{-1} (\equiv u_* \{ \langle C \rangle - C_{\text{bed}} \} / (-J)) = J_{0+}^{-1} + \langle A(z_+) \rangle \quad (3)$$

ここで、 $\langle \rangle$ は境界層内での平均量を意味する。式(3)において J_+^{-1} を全拡散抵抗とすれば、 $\langle A \rangle$ は乱流域($z > z_0$)の拡散抵抗を表し、 J_{0+}^{-1} は粗度要素間のcavity($z < z_0$)における拡散抵抗を表す。 $\langle A \rangle$ は以下の(4)式で定義された A をさらに z 方向に積分し、平均したものである。

$$A = \int_{z_0}^{z_+} \frac{dz_+}{1/Sc + \nu_t} \quad (4)$$

一方、 J_{0+}^{-1} は、化学工学等で用いられているcavity vortex理論により、相当粗度 k_s の関数として表わす事ができる。すなわち、cavityでの渦の交換頻度が $(k_s/u_*)^{-1}$ のオーダーであるとすれば、表面更新説とのアナロジーにより、以下の(5)式が得られる。

$$J_{0+} = c_1 (R_{e*} S_c)^{-1/2} \quad (5)$$

ここで、 c_1 は定数、 $R_{e*} (= k_s u_* / \nu)$ は粗度 R_e 数である。である。(4)及び(5)式を(3)式に代入し、スタントン数(無次元フラックス)を用いて整理すると以下ようになる。

$$S_t = \frac{-J}{\langle U \rangle (\langle C \rangle - C_{\text{bed}})} = \left(\frac{C_D}{2} \right)^{1/2} \frac{1}{J_{0+}^{-1} + \langle A \rangle} \quad (6)$$

式(6)を用いる事により、任意の粗度条件での物質のフラックスを求める事ができる。得られた計算結果を実験値と共に図-4に示す。図の破線はDade(1993)による抵抗係数評価式を、実線はColebrookの式を用いた結果をそれぞれ示す。実験値及び理論値共に、粗滑遷移領域においてフラックスが極大となる事を示している。これは、円管内において従来知られている傾向に一致している。また、実験値の方が理論値に比較してやや大きめである。この原因は、底生生物による攪乱の影響と思われる。

3. 結論 底面粗度が物質のフラックスに及ぼす影響を実験的及び理論的に調べた。その結果、粗滑遷移領域においてフラックスが極大となる事がわかった。

参考文献 1) Nakamura and Stefan (1994): J. Env. Eng., ASCE, Vol. 120, pp. 996-1016.

2) 中村由行・御子神学・朴崎鎬 (1994) 海岸工学論文集第41巻, pp. 1081-1085.

3) 中村由行・御子神学 (1994) 水工学論文集第38巻, pp. 223-228.

4) Dade (1993) Limnol. Oceanogr., Vol. 38, pp. 52-69.

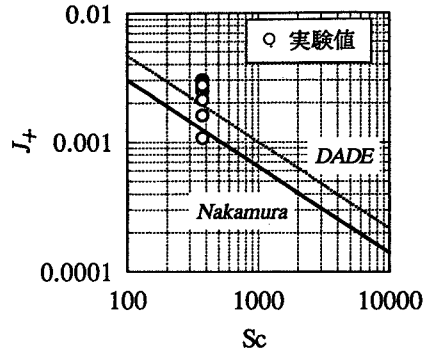


図3 滑面の理論式と実験値の比較

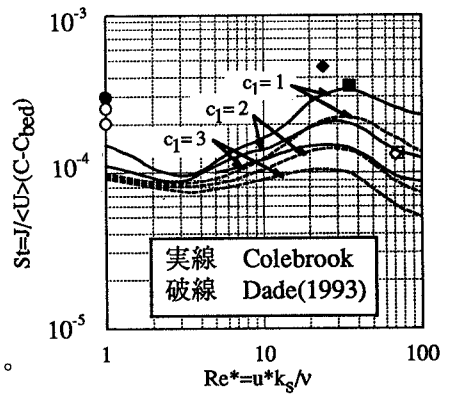


図4 粗面でのフラックス実験値と理論式の比較