

底面粗度が酸素消費速度に及ぼす影響

九州大学工学部 学生員○柳町 武志
正会員 中村 由行
学生員 井上 徹教
正会員 小松 利光

1. 緒言

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、水質管理上或いは地球化学における初期成作用や生態系の理解のために重要である。底泥表面でのフラックスの研究は、従来、もっぱら生物・化学的な面に関しての研究が主体であったが、近年、流れがフラックスを大きくかえる事が注目されはじめ、水理学的な影響についても研究が行われはじめた(例えば、Belanger, 1981; 細井ら, 1992)。著者ら(中村, 1993; 中村ら, 1994)は、境界層理論を応用して、底面直上の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。これらはいずれも底泥表面が水理学的滑面の場合を対象としている。粗面の場合には、滑面にくらべて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。実水域においても、生物活動由来の表面の粗さや侵食作用に基づく起伏等があるため、同様な粗度の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底質表面での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. 理論解析

図-1に粗面近傍の座標軸の定義を示す。完全粗面乱流の平均流速分布は、壁面から基準面 z_0 だけ離れた位置を境界とし、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考えると、全拡散抵抗 J_{+}^{-1} を乱流域($Z>Z_0$)の拡散抵抗 $\langle A \rangle$ 及び粗度要素間のcavity($Z<Z_0$)における拡散抵抗 J_{0+}^{-1} の和として(1)のように表せる。

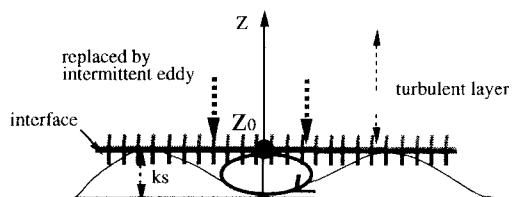


図-1 粗面近傍の模式図

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

ここで、 J は鉛直上向きを正とし、 $\langle \rangle$ を用いて表現された量は、境界層内の平均値を示す。 J の逆数 J^{-1} は拡散抵抗を表している。すなわち、物質が壁面から十分離れた($z_+ \gg z_0$)場所から底質表面へ輸送される時の全拡散抵抗が J_{+}^{-1} でありそのうち $z \gg z_0$ における乱流域の抵抗が $\langle A(z) \rangle$ 、粗度要素間にできるcavity($z \leq z_0$)における抵抗が、 J_{0+}^{-1} であるとみなすことができる。 $\langle A(z) \rangle$ は、以下の(2)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。

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 ks に関連づける事ができる。すなわち、cavityでの渦の交換頻度が $(ks/u_*)^{-1}$ 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(3)式が得られる。

$$A = \int_{0.1 Re_*}^{z_+} \frac{dc_i}{Sc^{-1} + \nu_*} \quad (2) \quad J_{0+}^{-1} = c_1 (Re_* Sc)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで、 c_1 は定数、 $Re_*(=ks u_*/\nu)$ は粗度レイノルズ数、 $Sc(=\nu/D)$ はシュミット数である。(2)及び(3)式を(1)式に代入する事により、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。

3.室内実験

2の解析の結果を検証する目的で、簡単な実験を行った。用いた実験装置は、長さ2.5m、幅25cm、高さ15cmの矩形断面の循環式管水路（図-1）である。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。装置の概形を図-6に示す。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、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。実験開始後、DO濃度の時系列変化から、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、その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。

得られた計算結果を実験値と共に図-3に示す。両者を比較すると、実験値及び理論値共に、粗滑遷移

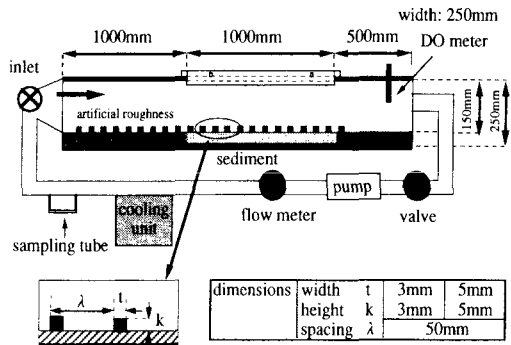


図-2 実験装置図及び粗度配置図

領域においてフラックスが極大となる事がわかる。完全粗面の領域において、粗度の増加と共にフラックスが減少傾向となる理由は、粗度要素間の Cavity 部分の割合が増え、そこでの拡散抵抗が増すためであると考えられる。また、理論計算の結果と比較して、実験値の方がやや大きい値を示している。実験では、滑面においても大きなフラックスとなっており、粗度要素の設置方法によるものではない事が示唆される。今のところ、底生生物による攪乱の影響である可能性が考えられる。

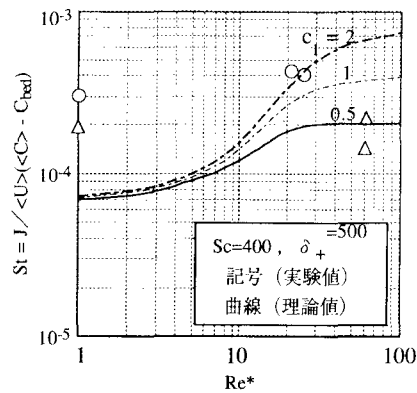


図-3 St 数と粗度レイノルズ数の関係

4. 結論

溶存酸素の底泥へのフラックスに及ぼす底面粗度の影響を、実験的及び理論的に調べた。矩形断面での実験結果と理論計算の結果を比較したところ、粗滑遷移領域においてフラックスが極大となる傾向について、よい一致がみられた。

5. 参考文献

中村由行 (1993) : 底質の酸素消費過程における濃度境界層の役割, 水環境学会誌, 第16巻, pp.732-741.
中村由行・御子神学 (1994) : 低 Reynolds 数乱流モデルを用いた、水・底泥界面での物質移動の解析, 水工学論文集, 第38巻 pp.223-228.
細井由彦・村上仁士・上月康則 (1992) : 底泥による酸素消費に関する研究, 土木学会論文集, No.456/II-21, pp.83-92.
Belanger, B.T. (1981) : Benthic oxygen demand in Lake Apopka, Florida, Water Research, Vol.15, pp.267-274.
Dade, W.B. (1993) : Near-bed turbulence and hydrodynamic control of diffusional mass transfer at the sea floor, Limnol. Oceanogr., Vol.38, pp.52-69.
Dawson, D.A. and O. Trass (1972) : Mass transfer at rough surfaces, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.15, pp.1317-1336.