

底面酸素輸送に対する非定常過程の重要性

○ 井上徹教

(独) 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域
横須賀市長瀬 3-1-1, E-mail: inoue-t@ipc.pari.go.jp

1. はじめに

これまで固液界面における輸送速度に対する粗度の影響については、特に化学工学の分野における熱・物質輸送に関する問題に対して検討されてきた。その結果から、界面が粗面である場合の熱・物質輸送速度は、一般に滑面の場合に比べて2~4倍大きいと報告されている。富栄養化した沿岸や湖においては、堆積物粒子は非常に細粒が多く、堆積物は通常非透水性として取り扱われる。従って、個々の堆積物粒子が粗度要素となることはないが、底生生物の活動や波の作用によりマウンドやノジュールが形成され、しばしば水理学的に粗面となるため、上記の物質輸送速度の増大が起こる可能性がある。

本研究では、水・堆積物界面における DO 拡散輸送速度に対する粗度および vortex shedding の影響について検討する。ここでは、水中での拡散現象を表現するモデルと、堆積物中の生化学的反応および拡散現象を表現するモデルとを結合することにより、界面における DO 濃度及び DO 輸送速度を算定する手法を用いた。

2. モデル構築

水中から堆積物中へ拡散現象は、大きく2つの箇所(水・堆積物界面直上に形成される拡散境界層と、水・堆積物界面直下の生化学的反応により DO 消費がおこる DO 浸透層)に分けて考えることができる。ここでは Inoue and Nakamura (2011)⁽¹⁾に従い、以下の3つの過程に分けてモデル化を行う。

- (a) 水中の拡散境界層中の拡散輸送に関するモデル化、
- (b) 堆積物中の酸化層中での拡散輸送および生化学的酸素消費過程に関するモデル化、
- (c) 水・堆積物界面における濃度と拡散輸送速度の連続性を用いた、上記2モデルの結合。

Dipprey and Sabersky (1963)⁽²⁾が提唱した cavity vortex theory に従うと、粗度要素間における semi-stagnant film 内の水塊が1回更新する際の DO 輸送速度 J は次式で表現される。

$$-J = \left(\frac{D_{zm}}{s} \right)^{\frac{1}{2}} \{ C_o(z_+ = z_{0+}) - C_o(z_+ = 0) \} \quad (1)$$

ここで、 D_{zm} は鉛直方向の分子拡散係数、 s は semi-stagnant film 内の水塊の更新周期、 z は鉛直方向の位置(水・堆積物界面を0、上向きを正とする)、 $C_o(z)$ は DO 濃度、 z_0 は semi-stagnant film 厚さ、添字 "+" は摩擦速度 u_* と動粘性係数 ν による無次元量を表す。無次元化された DO 輸送速度 J はスタントン数 St と呼ばれ、式(2)のように導出される。

$$St = \left(C_f / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ (Re_* \cdot Sc)^{\frac{1}{2}} / c_1 + A(z_+ = \infty) \right\}^{-1} \quad (2)$$

$$Re_* = u_* k_s / \nu \quad (3)$$

$$A(z_+ = \infty) \equiv \int_{z_{0+}}^{\infty} (Sc^{-1} + D_{z+})^{-1} dz_+ \quad (4)$$

ここで、 C_f は底面抵抗係数、 Sc はシュミット数、 c_1 は semi-stagnant film 内の水塊の更新周期に関連する定数、 k_s は相当砂粒粗度、 D_z は乱流拡散係数を表す。

Black (1968)⁽³⁾は壁面近傍での乱流場において有用なスケール則を導入し、理論的な解析および多数の実験結果から vortex shedding (渦放出) の平均周波数 ω について定式化している。

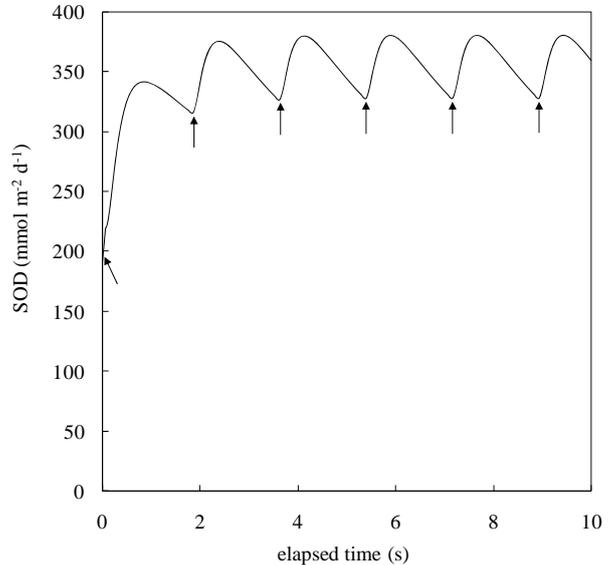


図-1 vortex shedding 発生に伴う DO 輸送速度の変動

$$\omega v / u_*^2 = 2\pi v / su_*^2 = 0.056 \quad (5)$$

また、堆積物モデルとの結合により、水・堆積物界面における DO 濃度も次式のように得られる。

$$C_o(z=0) = D_s R / St^2 \bar{u}^2 + C_o(z=\infty) - \sqrt{\left(D_s R / St^2 \bar{u}^2 + C_o(z=\infty) \right)^2 - C_o(z=\infty)^2} \quad (6)$$

ここで、 D_s は堆積物中での見かけの拡散係数、 R は単位体積当たりの堆積物による DO 消費速度、 u はバルク領域における水平方向の平均流速を表す。以上より、式(1)および(2)から水・堆積物界面における DO 輸送速度およびスタントン数が計算できる。詳細については、Inoue and Nakamura (2011)⁽¹⁾を参照されたい。

3. vortex shedding 直後の非定常過程

Inoue et al. (2000)⁽⁴⁾は、直上水中の DO 濃度の急変直後における DO 輸送速度の非定常的な変動について検討している。ここではこの概念を、vortex shedding により断続的に水塊の更新が起こる粗度要素間に適用し、DO 輸送速度に与える影響について議論する。

vortex shedding 発生に伴う DO 輸送速度の非定常計算の結果の一例を図-1に示す。この変動については、1) vortex shedding 発生前には、界面における DO 濃度勾配は比較的緩やかで、拡散輸送速度も比較的小さい値をとる、2) vortex shedding 発生直後は、semi-stagnant film 上部の水塊が更新され、DO 濃度の勾配は一時的に急になり、DO 拡散輸送速度もまた一時的に大きな値となる、3) その後、拡散境界層の発達に伴い、DO 濃度勾配は次第に緩やかになり、DO 拡散輸送は定常状態でのそれに近づいていく(図-2参照)と解釈される。このような非定常過程を考慮しない場合の定常計算結果と比較したところ、定常計算の結果は非定常計算の結果を時間平均した値よりも約41%過小評価していることが分かった。この結果により、粗度要素間のキャビティー内における水塊の交換率を定量的に評価し、その水塊交換により直上水の DO

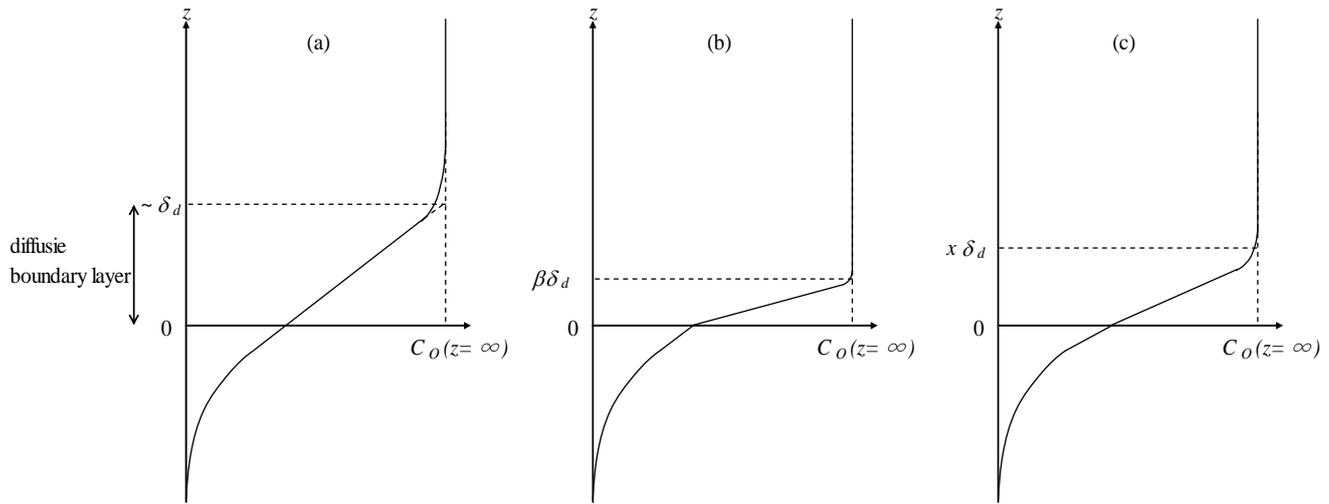


図-2 vortex shedding 発生前後における、水・堆積物界面近傍での DO 濃度の鉛直分布の非定常的な変動についての概念図

濃度が急変し水・堆積物界面における拡散輸送が非定常的に変化することを考慮することによって、計算結果が著しく修正されることがわかった。

4. 非定常効果によるスタントン数の増幅係数

上述の非定常過程を考慮した数値計算は非常に煩雑で、水・堆積物界面における酸素輸送速度を定量化する上で実用的であるとは言いがたい。そこで本節では、上記の非定常過程を考慮することによるスタントン数の増幅効果を簡単に定量化・定式化することを試みる。

図-3に摩擦速度と上記の非定常過程を考慮することによるスタントン数の増幅係数Fとの関係を示す。ただし、ここでは中村ら(1995)⁹⁾が行った水・堆積物界面での物質移動速度に及ぼす底面粗度の影響に関する実験条件を元に計算された値のみを示しており、ここでの議論はその実験条件の範囲内 ($0.2 \text{ cm s}^{-1} < u_* < 3.6 \text{ cm s}^{-1}$) でのみ適用されるものであることに注意されたい。図-3から、摩擦速度の増加に伴い、上述の条件の範囲内においては、スタントン数の増幅係数Fは単調に減少していることがわかる。この増幅係数Fの変動は、摩擦速度の二次関数で表現される簡単な回帰式で再現可能である。

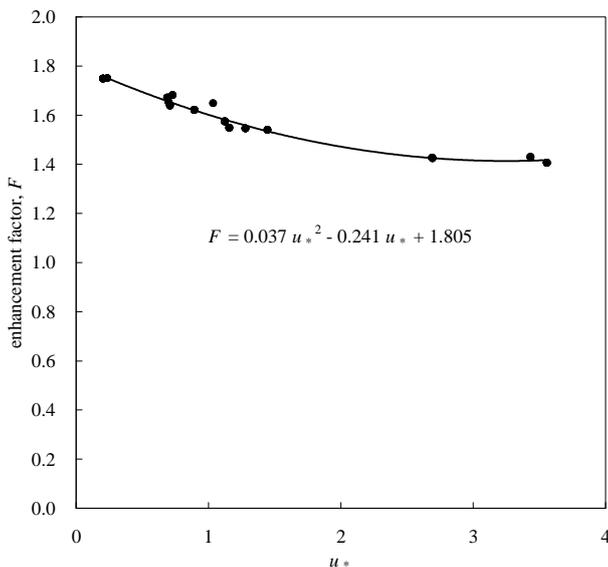


図-3 摩擦速度と非定常過程を考慮することによるスタントン数の増幅係数Fとの関係

$$F = 0.037u_*^2 - 0.241u_* + 1.805$$

$$(0.2 \text{ cm s}^{-1} < u_* < 3.6 \text{ cm s}^{-1}) \tag{7}$$

一方、スタントン数の増幅係数Fと相当砂粒粗度や他のパラメーターとの間には明瞭な関係は見られなかった。

上述の非定常過程を考慮した数値計算は非常に煩雑で、実用的ではないが、底面摩擦の情報を基に、式(7)を用いることによって非定常過程を考慮せずに求めたスタントン数を合理的に修正することが可能となる。

5. 結論

本稿では、水理学的に粗面であると判断される水・堆積物界面における DO の拡散フラックスについて理論モデルを構築した。粗度要素間における水塊の交換 (vortex shedding)、およびそれに伴う拡散境界層内の DO 濃度の急変による DO 拡散輸送の非定常的な変動は、DO 輸送速度に対して重要な現象であることが示された。今後は実験結果等との比較により、本モデルの検証を行う予定である。

参考文献

- (1) Inoue, T. and Y. Nakamura (2011). "Effects of hydrodynamic conditions on DO Transfer at a rough sediment surface." Journal of Environmental Engineering 137(1): 28-37.
- (2) Dipprey, D. F. and R. H. Sabersky (1963). "Heat and momentum transfer in smooth and rough tubes at various prandtl numbers." International Journal of Heat and Mass Transfer 6(5): 329-352.
- (3) Black, T. J. (1968). An analytical study of the measured wall pressure field under supersonic turbulent boundary layers. NASA Contractor Report. Washington, D.C., National Aeronautics and Space Administration. CR-888.
- (4) Inoue, T., Y. Nakamura and Y. Adachi (2000). "Non-steady variations of SOD and phosphate release rate due to changes in the quality of the overlying water." Water Science and Technology 42(3-4): 265-272.
- (5) 中村由行, 柳町武志, 井上徹教 (1995). "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 42: 1046-1050.