

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1194

March 2009

水・堆積物界面での溶存酸素輸送に対する流動の影響 —粗度の影響を考慮した理論的考察—

井上 徹教

中村 由行

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
1.1 背景	4
1.2 目的	5
2. モデル構築	5
2.1 モデル構築における前提及び仮定	5
2.2 拡散境界層内のモデル化	6
2.3 堆積物中での拡散輸送と生化学反応のモデル化	7
2.4 拡散境界層中と堆積物中のモデルの結合	7
3. モデル計算結果	8
3.1 シュミット数の影響	8
3.2 $c_l$ の影響	8
4. 考察	10
4.1 水・堆積物界面における DO 濃度推定の重要性	10
4.2 $c_l=1$ とした場合の理論解と実験結果との比較	10
4.3 粗度要素間の水塊交換率の定式化	11
4.4 vortex shedding 直後の非定常過程	13
4.5 水塊の交換率の定式化と vortex shedding 直後の非定常過程との組み合わせ	14
4.6 非定常効果によるスタントン数の増幅係数	14
5. あとがき	15
参考文献	16
付録	17
付録 A シュミット数および乱流シュミット数	17
付録 B 堆積物中の見かけの拡散係数	17
付録 C ダムケラー数	18
付録 D 拡散境界層中でのスタントン数の導出	18
付録 E $R$ の定式化	19
付録 F $R$ の測定	19
付録 G 理論との比較に用いた実験	19
付録 H 粗さのレイノルズ数と $\alpha_{St}$ との関係	21
付録 I vortex shedding 発生直後の SOD の変動	21
付録 J 用語解説	26
付録 K 記号表	26

# Effects of Hydrodynamic Control on Diffusive Dissolved Oxygen Transfer -Theoretical Formulation Considering Roughness Effect-

Tetsunori INOUE\*  
Yoshiyuki NAKAMURA\*\*

## Synopsis

The numerical model was developed to calculate diffusive dissolved-oxygen (DO) transfer rate at the rough sediment surface, considering hydraulic conditions in the water and biochemical reactions in the sediment. Calculation results showed a characteristic tendency of the relationship between DO transfer rate and roughness Reynolds number ( $Re_*$ ). Namely, non-dimensionalized DO transfer rate (Stanton number,  $St$ ) had a maximum value in the transitional region of surface roughness, in which the mass flux was three-four times larger than that at the smooth surface. In the completely rough region ( $Re_* > 100$ ),  $St$  decreased gradually as  $Re_*$  increases, which was due to the effects of viscous ponding in the cavity between the roughness elements. Although this tendency was qualitatively the same as those of existing papers in the field of heat and mass transfer engineering, quantitative estimations of  $St$  values required consideration of biochemical reactions in the sediment and quantification of DO concentration at the sediment surface. The reproducibility of the experimental results by the numerical analysis was significantly improved by quantitative formulation of the flushing frequency of water fragment in the cavity between roughness elements and considering non-steady variations in diffusive transfer rate due to step changes in DO concentration in the flushed region.

**Key Words:** DO transfer, sediment-water interface, surface roughness, hydrodynamic control

---

\* Senior Researcher of Coastal and Estuarine Environment Research Group

\*\* Executive Researcher

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5046 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:inoue-t@pari.go.jp

# 水・堆積物界面での溶存酸素輸送に対する流動の影響

—粗度の影響を考慮した理論的考察—

井上 徹教\*  
中村 由行\*\*

## 要 旨

水・堆積物界面における溶存酸素 (DO) の輸送速度を評価するため、堆積物表面の粗さと堆積物中での生化学的な反応を考慮した数値モデルを構築した。計算結果から、無次元化した DO 輸送速度 (スタントン数,  $St$ ) には特徴的な傾向がみられ、滑面においては粗さのレイノルズ数 ( $Re_*$ ) の増加に伴い単調に増加し、粗滑遷移領域において滑面における 3–4 倍程度の極大値をとった後、完全粗面の条件下 ( $Re_* > 100$ ) では単調に減少することがわかった。これは粗度要素間に死水領域が生じるためである。この結果は熱物質輸送工学の分野での既存の結果と定性的には一致するが、定量的に  $St$  を評価するためには堆積物中での生化学的な反応を考慮し、水・堆積物界面における DO 濃度を評価する必要があることがわかった。さらに、定量的な  $St$  の評価には粗度要素間の水塊交換率を定式化し、水塊交換に伴う非定常過程を考慮する必要があることがわかった。

キーワード：DO 輸送，水・堆積物界面，粗度，水理条件

---

\* 海洋・水工部沿岸環境研究領域主任研究官

\*\* 研究主監

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5046 Fax：046-844-1274 e-mail:inoue-t@pari.go.jp

## 1. まえがき

### 1.1 背景

溶存酸素 (Dissolved Oxygen, DO) は水圏の生化学的反応において用いられる最も有効な酸化剤である (Bakker and Helder 1993; Glud et al. 1994; Steinberger and Hondzo 1999). そのため, DOは水圏生態系における光合成・呼吸・物質の酸化等を通じた物質循環において支配的な役割を担っており, 水圏生態系の状態を規定する最も重要な物質のひとつであると考えられる. 従って, 水圏環境中における生態系や代謝活性, 物質循環を理解する上では, 水柱におけるDOの収支を定量化することが必要である.

水柱におけるDOの収支を概観すると, 一般的には, 水柱のDOは水表面における再曝気や水中の植物プランクトン, またはより大型の水中植物の光合成により供給される. 一方DOの消費については, 特に富栄養化した水域においては, 堆積物による酸素消費 (sediment oxygen demand, SOD) が主たる消費を担っていると考えられる (Nakamura and Stefan 1994; Steinberger and Hondzo 1999). 堆積物中のDOはそこでの酸化還元状態に多大な影響を与える重要なパラメーターであり, 水・堆積物界面におけるDO以外の物質収支にも大きく影響を及ぼす. さらに, 特に富栄養化した浅い内湾や湖においては, SODがDO収支に果たす役割は底層の貧酸素化・無酸素化という形で非常に顕著に現れ, そこでの底生生物の分布を中心とした生態系に大きな影響を及ぼすため, SODを定量的に評価することは非常に重要な課題であると考えられている (Slomp et al. 1998).

しかし, SODについてはこれまで数多くの研究がなされているにもかかわらず, その定量的な評価については未だに統一的な指針がなく, 困難であることが指摘されている (Arega and Lee 2005). 評価法については, これまで様々な現場観測手法, 室内実験手法, 数値解析手法が提案されている. しかし一般的には, 理論的な評価法ではSODを過小評価することが多い. その原因のひとつには, 底生成物がおこす生物攪乱 (bioturbation) による拡散係数の増大や, 底生生物の巣穴形成による堆積物表面積の増大などが挙げられる (Revsbech and Jørgensen 1986). さらに, これらと同様に重要であると考えられる過程として, SODに対する界面近傍の水理条件の影響が指摘されている.

1980年代以降, 水・堆積物界面における物質輸送に対しては, 底面境界層における水理条件が大きな影響を与えることが指摘されてきた (Belanger 1981; Inoue et al.

2000; Arega and Lee 2005). これは水・堆積物界面直上に形成される, 拡散境界層の形成が水理条件の影響を受けるためであると考えられている. 拡散境界層は通常1 mm以下の長さスケールを持ち, この中ではDOに代表されるような溶存物質濃度は急激に変化する (Santschi et al. 1983; Revsbech and Jørgensen 1986). そのため, 拡散境界層は溶存物質の輸送速度に対して支配的な役割を果たしており (Steinberger and Hondzo 1999), 結果として水・堆積物界面直下の生化学的反応にも大きな影響を与えている. 堆積物表面の粗度はこの拡散境界層の形成に影響を与えるため, 溶質の拡散速度にも大きな影響を与えることが予想される.

これまで固相と流体相間の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 (例えばYaglom and Kader 1974など). 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. 例えば, Dipprey and Sabersky (1963)は広い範囲のレイノルズ数, 粗度比, およびプラントル数について実験データを取得し, 滑面の場合に対して粗面においては270%の熱伝達率の増加を明らかにした. Dawson and Trass (1972)やZhao and Trass (1997)は, V字形の粗度を持つ矩形のダクト中において, 固相としてのニッケル表面と液相としてのフェリシアニド電解質の間の電気化学的な物質輸送速度を測定し, 無次元化した粗度高さが約10のときに物質輸送速度が滑面の場合の3-4倍になることを示した. 水環境研究の分野では, 透水性の堆積物 (Forster et al. 1996) やサンゴ礁群落 (例えばBilger and Atkinson 1992, Falter et al. 2005) に対して表面粗度の物質輸送への効果が検討され, その増幅効果が指摘されてきた. 非浸透性の堆積物に関しては, そのような増幅効果はほとんど見られないことが指摘されている (Roy et al. 2005).

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分が多く, 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. しかし, 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. そのため, 富栄養化した沿岸や湖においても堆積物表面が粗面となるため, 上記の物質輸送速度の増大が起こる可能性がある. しかしながら, 水・堆積物界面における物質輸送速度に対する粗度の影響に関する研究は極めて限られている.

これに対して, Dade (1993)はclosure schemeを用い, 粗な水・堆積物界面直上の水平方向平均流速分布と溶存物

質濃度分布を理論的に導出し、界面における溶質の輸送速度を計算している。しかしながら、そこでは水・堆積物界面における溶存物質濃度は計算されておらず、一定値として取り扱われている（実際には0として計算がなされている）。DOのような反応性のある物質を取り扱う際には、水・堆積物界面における溶存物質濃度は与条件として取り扱うことはできず、直上水中での物理的な要因と堆積物中での生化学的な要因の両方の影響を受け決定される。このような固液界面における熱・物質輸送の問題について、固相における反応性の物質を取り扱った研究例や固液界面における物質濃度や温度の変動を取り扱った研究例は、化学工学の分野においてもほとんどみられない。

一方、界面における溶質の輸送速度を検討する際は、界面付近における溶質の鉛直分布から濃度勾配を計算し、単純な拡散輸送速度を推算する方法が一般的である。しかし、この方法では常に実際の輸送速度を過小評価する結果となることが指摘されている（例えば、Berg et al. 2003）。この原因としては、堆積物の表面積の過小評価、水平方向の圧力勾配による間隙水の移流などの影響が指摘されているが（例えば、Roy et al. 2005）、現段階では未解明の問題となっている。

## 1.2 目的

本研究では水・堆積物界面におけるDOの拡散輸送速度について、粗度の影響について理論的に検討する。拡散境界層中（水中）のDO濃度分布や拡散フラックスについては、Dade (1993)により提案されたモデルを基本として定式化を行う。また、堆積物中の生化学的反応と拡散現象については、Nakamura and Stefan (1994)の定式化を踏襲するものとする。これらの両定式化を合理的に結合することにより、界面におけるDO濃度及びDO輸送速度を計算し、水中及び堆積物中での過程を考慮した解析を行う。さらに、得られた理論解は既存の実験結果と比較し、それらの違いについて考察する。また、それらの違いを説明可能な原理としてvortex sheddingについて検討し、その周期および非定常的な過程を考慮する必要性について述べる。さらに、vortex sheddingの影響に関して定常解を簡便に修正する方法を提案する。

## 2. モデル構築

### 2.1 モデル構築における前提及び仮定

一般的に富栄養化した水域の堆積物中には高濃度の有機物の蓄積がみられ、そこでは主に微生物による呼吸活

性が高く、非常に高い酸素消費速度が観察される。また、堆積物表層に見られる酸化層より下方では還元的な環境となっており、そこでは嫌気性細菌の活性により様々な物質の酸化還元反応がおこっている。そのため、富栄養化した水域の堆積物の間隙水中には鉄やマンガンを中心とした還元物質が溶解しており、これらもDO消費の要因となる。結果として堆積物中のDO濃度は水中のそれよりも低く、水・堆積物間においてDO濃度差が生じるため、拡散現象により水中から堆積物中へDOが輸送される。拡散によるDO輸送を考える上では、大きく2つの箇所に分けて考えることができる。即ち、水・堆積物界面直上に形成される拡散境界層と呼ばれる部分と、水・堆積物界面直下の生化学的な反応によりDO消費がおこるDO浸透層である。

通常、境界層および拡散境界層を含む壁面付近におけるDOの拡散現象を考える場合には、そこでの流速分布（運動量の拡散）とのアナロジーで議論される。すなわち、拡散境界層内のDO濃度分布は壁面付近（境界層内）の流速分布と相似な形をとることが予想される。しかし、一般的な環境条件においては動粘性係数（運動量の拡散係数）とDOの分子拡散係数との比であるシュミット数（Schmidt number,  $Sc$ , 付録A参照）は300から1000の間の値をとり、DO拡散の空間スケールは流速分布（運動量の拡散）の空間スケールに比べてはるかに小さい。そのため、通常拡散境界層厚さは粘性底層厚さよりも小さく、数mm以下の長さスケールである。

一方、堆積物中におけるDO消費に関わる部分（酸化層）の長さスケールは、堆積物単位体積当たりの酸素消費速度と堆積物中の見かけの拡散係数（付録B参照）によって決定される。ここでも富栄養化した水域での環境条件においては、1cmオーダー以下のスケールである。

SODのモデル化は、この水・堆積物界面の上下約1cm以内の範囲を対象にして行う。モデル化において難しい問題のひとつは、水・堆積物界面におけるDO濃度 $C_o(z=0)$ の見積である。なぜなら、 $C_o(z=0)$ は余条件として与えられるものではなく、水・堆積物界面よりも上の境界層内における水理条件と、その下の表層堆積物中での生化学的な反応による酸素消費過程に依存して決まるものだからである。この問題については、水中での過程と堆積物中での過程を別々にモデル化し、それらを結合することにより解決することができる。すなわち、本モデル化の過程は以下の3つに分けることができる。

- (a) 拡散境界層中の拡散輸送に関するモデル化,
- (b) 酸化層中での拡散輸送および生化学的な酸素消費過程に関するモデル化,

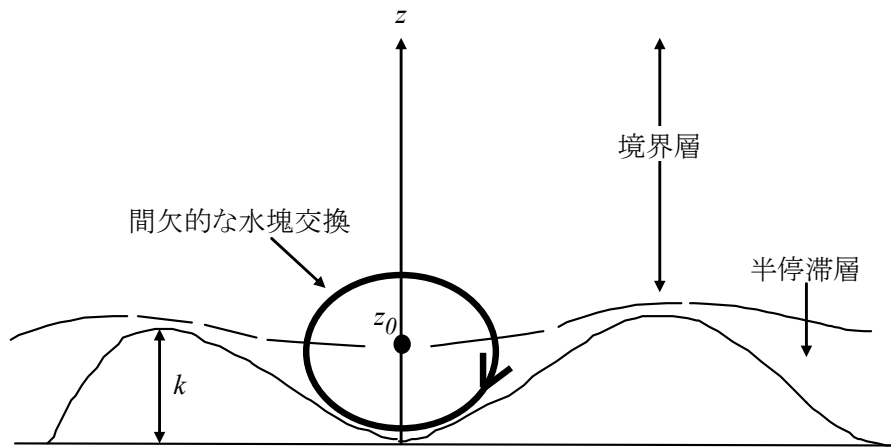


図-1 粗面上の水塊構造の模式図

(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。

以下では、これらについて順に述べる。

## 2.2 拡散境界層内のモデル化

Dade (1993)は壁面近傍の乱流エネルギーの収支を考慮した簡単なclosure schemeを元に、渦動粘性係数や乱流拡散係数を定義する理論モデルを提案している。そこでは粗度の影響を受けた水理条件を踏まえた拡散輸送を合理的に取り扱うために、Dipprey and Saberski (1963)により提唱されたcavity vortex hypothesisが採用されている。cavity vortex hypothesisにおいては、水・堆積物界面直上の水柱は2つの部分に分けられる(図-1参照)。一つはsemi-stagnant filmと呼ばれる主に粗度要素間のキャビティー内( $0 < z < z_0$ )に存在する水塊であり、そこでの平均流速は0となる。もう一つはキャビティー上の領域( $z > z_0$ )を指し、そこでの水平方向平均流速の鉛直分布は対数則に近い分布をとる。

ここでは、拡散境界層内での拡散輸送の定式化についてはDade (1993)に従い、以下の仮定を用いてモデル化を行う。

- (a) キャビティー内の水塊の交換以外については、定常状態を仮定できること、
- (b) バルク領域においては流速及びDO濃度は水平方向に一様であること、
- (c) 境界層は十分に薄く、そこでのDO消費は無視できること。

(a)及び(b)の仮定により非定常項を考慮しない鉛直一次元の拡散方程式の適用が可能となり、以後の取扱が容易になる。また、一般的な環境条件下ではダムケ

ラー数(付録C参照)は十分に小さく、(c)の仮定は適切であると考えられる(Boudreau 2001)。

拡散による溶存物質の輸送速度 $J$ は、次式の拡散方程式で表現できる。

$$J = -(D_{zm} + D_{zt}(z)) \frac{dC(z)}{dz} \quad (1)$$

ここで、 $D_{zm}$ は鉛直方向の分子拡散係数、 $z$ は鉛直方向の位置(水・堆積物界面を0、上向きを正とする)、 $C(z)$ は溶質濃度、 $D_{zt}(z)$ は乱流拡散係数を表し $z$ の関数となる。以下では乱流シュミット数 $Sc_t$ (付録A参照)は1と仮定すると、 $D_{zt}(z)$ は渦動粘性係数 $\nu_t(z)$ と同じ式で表現される(Dade 1993)。

$$D_{zt+} = \frac{\left\{ \kappa z_+ \left( 1 - \frac{z_+}{\delta_+} \right)^2 - 2 \right\} + \left[ \left\{ \kappa z_+ \left( 1 - \frac{z_+}{\delta_+} \right)^2 - 2 \right\}^2 - 4 \right]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (\text{at } z_+ > 10) \quad (2)$$

$$D_{zt+} = K z_+^3 \quad (\text{at } z_+ < 10) \quad (3)$$

ここで、添字“+”は摩擦速度 $u_*$ と動粘性係数 $\nu$ によって無次元化された無次元量、 $\kappa$ はカルマン定数(= 0.4, Grant and Madsen 1986)、 $\delta_+$ は境界層厚さ、 $K$ は定数で $10^{-3}$ の値をとる(Dade 1993)。

Dipprey and Saberski (1963)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回更新する際の物質輸送フラックスは式(4)で表現される。

$$-J = \left( \frac{D_{zm}}{s} \right)^{\frac{1}{2}} C(z_+ = z_{0+}) - C(z_+ = 0) \quad (4)$$

ここで、 $s$ はsemi-stagnant film内の水塊の更新周期を表

す。

DO濃度とバルク領域内でのDO濃度との差を考慮し、式(1)を $z$ 方向に積分することで、鉛直方向のDOの拡散フラックスを表現する式が得られる。最終的に無次元化されたSODはスタントン数 (Stanton number,  $St$ ) と呼ばれ、式(5)のように導出される。式(5)導出の詳細については、付録Dを参照されたい。

$$St = \frac{SOD}{\bar{u}\{C_o(z=\infty) - C_o(z=0)\}} = \left(\frac{C_f}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{(Re_* \cdot Sc)^{\frac{1}{2}}}{c_1} + A(z_+ = \infty) \right\}^{-1} \quad (5)$$

$$Re_* = \frac{u_* k_s}{\nu} \quad (6)$$

$$A(z_+ = \infty) \equiv \int_{z_0^+}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{1}{Sc} + \frac{D_{z_+}}{\nu}\right)} dz_+ \quad (7)$$

ここで、 $\bar{u}$ はバルク領域における水平方向の平均流速、 $C_o(z=\infty)$ はバルク領域におけるDO濃度、 $C_o(z=0)$ は水・堆積物海面におけるDO濃度、 $C_f$ は底面抵抗係数、 $Re_*$ は粗さのレイノルズ数、 $c_1$ はsemi-stagnant film内の水塊の更新周期に関連する定数、 $k_s$ は相当砂粒粗度を表す。式(5)の右辺  $\{$  内第一項はsemi-stagnant filmにおける溶存物質の拡散に対する抵抗、 $A$ はsemi-stagnant filmを除く拡散境界層内における溶存物質の拡散に対する抵抗を表す。

### 2.3 堆積物中での拡散輸送と生化学反応のモデル化

Bouldin (1968)は、単位体積当たりの堆積物によるDO消費速度 $R$ と堆積物中での見かけの拡散係数 $D_s$ は鉛直方向に変化しないと仮定して、堆積物中でのDOの拡散輸送について解析を行っている。この場合、堆積物中でのDO消費を考慮したDO収支式(拡散方程式)は次式で表される。

$$\frac{dC_o}{dt} = D_s \frac{d^2 C_o}{dz^2} - R \quad (8)$$

ここで、 $t$ は時間を表す。式(8)を堆積物表層の酸化層について鉛直方向に積分することより、定常状態における堆積物中のDO鉛直プロファイルは次式により表される。

$$C_o(z) = \frac{1}{2} \frac{R}{D_s} z^2 + \left\{ \frac{1}{2} \frac{R}{D_s} \delta_s + \frac{C_o(z=0)}{\delta_s} \right\} z + C_o(z=0) \quad (9)$$

ここで、 $\delta_s$ は次式で定義される堆積物表層の酸化層厚

さである。

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2D_s C_o(z=0)}{R}} \quad (10)$$

式(9)の導出にあたっては、DO濃度分布に対して以下の境界条件を設定して用いた。

$$C_o = C_o(z=0) \quad (\text{at } z=0) \quad (11)$$

$$C_o = 0 \quad (\text{at } z = -\delta_s) \quad (12)$$

SODは水・堆積物界面における拡散フラックスとして定義されるため、式(9)の微分から次式が得られる。

$$SOD = D_s \frac{dC_o(z)}{dz} \Big|_{z=0} = \sqrt{2D_s R C_o(z=0)} \quad (13)$$

$R$ については、生物学的呼吸による酸素消費と化学的反応による酸素消費に分けて定式化することができる(付録E参照)。また、 $R$ は実験的に測定することが可能で(付録F参照)、以下の議論では実験的に求められた $R$ 等の値を用いて実験値と理論解との比較を行う。

### 2.4 拡散境界層中と堆積物中のモデルの結合

式(5)は拡散境界層中でのDO拡散輸送速度を表している。一方、式(13)は堆積物界面におけるDOの拡散輸送速度を表している。上記(c)の仮定から、式(5)および(13)で表される拡散輸送フラックスは一致する。また、水・堆積物界面におけるDO濃度はその連続性から、これも一致する。そこで式(5)および(13)から水・堆積物界面におけるDO濃度を消去すると、最終的に摩擦速度とバルク領域でのDO濃度との関数で表されるSODの評価式が得られる。

$$2 \left( \frac{4k_*}{U_*^3} - \frac{1}{U_*} \right) SOD_*^3 - \left[ \frac{4\{k_*(3+K_{O_*})+1\}}{U_*^2} - K_{O_*} + 1 \right] SOD_*^2 + \frac{2\{k_*(3+K_{O_*})+2\}}{U_*} SOD_* - \{k_*(1+K_{O_*})+1\} = 0 \quad (14)$$

ここで、それぞれの無次元パラメーターは以下のように定義できる。

$$SOD_* = \frac{SOD}{\sqrt{2D_s R C_o(z=\infty)}} \quad (15)$$

$$U_* = \bar{u} \sqrt{\frac{2C_o(z=\infty) St^2}{D_s R}} \quad (16)$$

$$K_{O_*} = \frac{K_o}{C_o(z=\infty)} \quad (17)$$

$$k_* = \frac{k C_o(z=\infty)}{R} \quad (18)$$

本理論モデルによると、SODはバルク領域の平均流



速, バルク領域の平均DO濃度, 摩擦速度, 相当砂粒粗度, シュミット数の関数となる. さらにこれらの定式化により, 水・堆積物界面におけるDO濃度も次式のように得られる.

$$C_o(z=0) = \frac{D_s R}{St^2 \bar{u}^2} + C_o(z=\infty) - \sqrt{\left\{ \frac{D_s R}{St^2 \bar{u}^2} + C_o(z=\infty) \right\}^2 - C_o(z=\infty)^2} \quad (19)$$

### 3. モデル計算結果

#### 3.1 シュミット数の影響

計算結果の一例として, 粗さのレイノルズ数と理論的に計算されたスタントン数との関係を図-2に示す. ここではシュミット数をパラメーターとして変化させ,  $c_l$ には1を採用している (Dade 1993). まず, 一般的な傾向として, スタントン数の粗さのレイノルズ数への依存性が挙げられる. 即ち, 粗さのレイノルズ数が小さな範囲 (水理学的滑面の場合) では, 粗さのレイノルズ数の増加に伴いスタントン数は単調に増加する. その後, 粗さのレイノルズ数が30から100の範囲 (粗滑遷移領域) で極大値をとり, それより大きな粗さのレイノルズ数の範囲 (水理学的粗面) においては単調に減少する. これは粗度要素間に存在する水塊の挙動の変化によるものと考えられている.

粗さのレイノルズ数が低い範囲では境界層内の動粘性係数および拡散境界層内の乱流拡散係数が小さく, 拡散によるDO輸送は小さい. また摩擦応力も小さく, 堆積物直上 (拡散境界層内) の水塊は比較的停滞しており, バルク領域との水塊交換はそれほど活発ではない. このため, 粗さのレイノルズ数が低い範囲ではDO輸送は小さいものと考えられる. 粗さのレイノルズ数が大きくなるに従って粗度要素間に存在する水塊への摩擦応力も大きくなり, バルク領域の水塊との交換が活発になる. この結果, 粗滑遷移領域では拡散輸送も増大する.

しかし, さらに粗さのレイノルズ数が増大すると, 相対的に粗度要素の影響が大きくなるため, 粗度要素間が死水領域となりバルク領域との水塊交換率が減少する. そのため, 粗度要素間の停滞水塊が拡散抵抗となり, 拡散境界層内における溶存物質の拡散輸送は抑えられる. 以上の結果より, 粗滑遷移領域で極大値をとるといふ上述の結果が得られる.

このような傾向は, 化学工学の分野での粗い壁面に

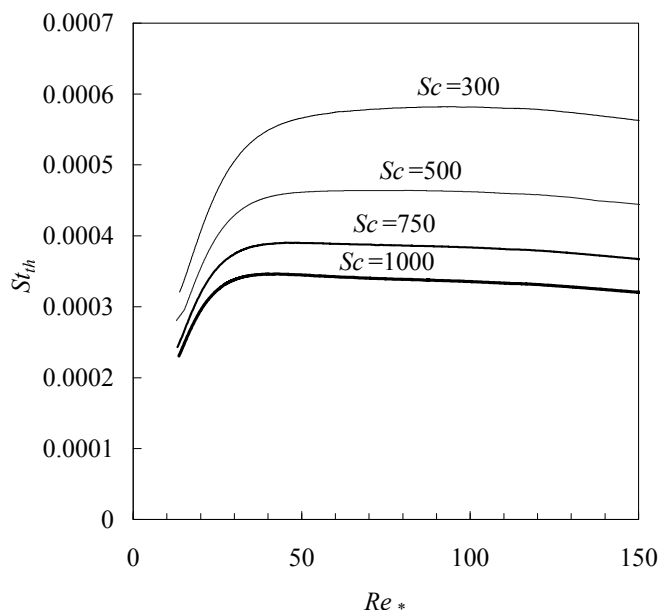


図-2 シュミット数をパラメーターとした場合の粗さのレイノルズ数とスタントン数との関係

における熱輸送 (例えば, Dipprey and Sabersky 1963) や物質輸送 (例えば, Dawson and Trass 1972) において見出された傾向と定性的には同様のものである.

さらに図-2からは, スタントン数はシュミット数の増加に対して単調に減少する傾向も見てとれる. シュミット数が大きいということは, 運動量の拡散に比べて溶質の拡散が相対的に小さなことを意味するため, 水・堆積物界面における物質輸送も相対的に小さな値となるためと考えられる.

#### 3.2 $c_l$ の影響

計算結果の一例として,  $c_l$ をパラメーターとした場合の粗さのレイノルズ数とスタントン数との関係を図-3に示す. Dade (1993)のFig. 7(a)にも同様の計算結果が示されているが, 同じ $c_l$ の条件の計算結果を比較してみると本稿における計算結果の方が大きな値をとっていることがわかる. これは, 本計算においては水・堆積物界面におけるDO濃度をそこでの濃度とフラックスの連続性から求め, その値をスタントン数の計算に用いているのに対し, Dade (1993)では水・堆積物界面におけるDO濃度を0と仮定してスタントン数を計算しているためである. この水・堆積物界面におけるDO濃度の推算の重要性については, 考察の部分で再度議論する.

Dade (1993)の計算結果に比べて, 本研究での計算結

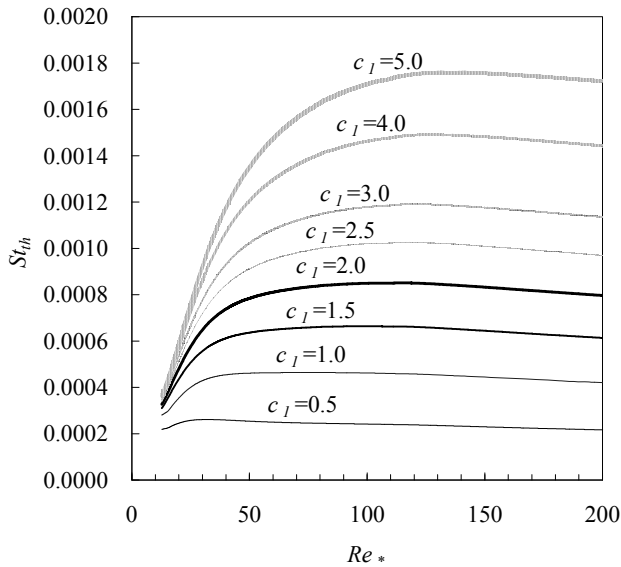


図-3  $c_1$ をパラメーターとした場合の粗さのレイノルズ数とスタントン数との関係

果はより大きな粗さのレイノルズ数においてスタントン数が極大値をとる結果となっている。これも水・堆積物界面におけるDO濃度の推算法の違いによるものと考えられる。即ち、Dade (1993)のように水・堆積物界面におけるDO濃度を強制的に0としている場合には、粗さのレイノルズ数の増加に伴い粗度要素間の水塊交換が活発になった場合でも堆積物内部における酸素消費は増大しない。そのため、粗さのレイノルズ数の増加に伴い本来増加するはずのDO輸送速度も、より低い粗さのレイノルズ数において最大値をとるためであると考えられる。

さらに、本研究において計算されたスタントン数は $c_1$ の増加に対して単調増加を示すのに対し、Dade (1993)では $c_1$ の増加に対して単調減少を示す結果となっている。 $c_1$ の増加は粗度要素間の水塊の交換率の増加を示し、それは水・堆積物界面における物質輸送を促進するはずである。よって、筆者らはスタントン数は $c_1$ の増加に対して単調増加を示すと判断する。

シュミット数をパラメーターとした場合の、 $c_1$ とスタントン数が最大値をとる粗さのレイノルズ数 $Re_{*max}$ との関係を図-4に示す。この結果によると、 $Re_{*max}$ は $c_1$ の単調増加関数となる。これは $c_1$ が増加することにより粗度要素間の水塊交換率が増加し、semi-stagnant film内部とバルク領域との間の物質輸送速度が増加するためである。このスタントン数に対する $c_1$ の影響の程度はシュミット数によって変化する。つまり、シュミット数が大きい値をとる場合には、より小さな粗

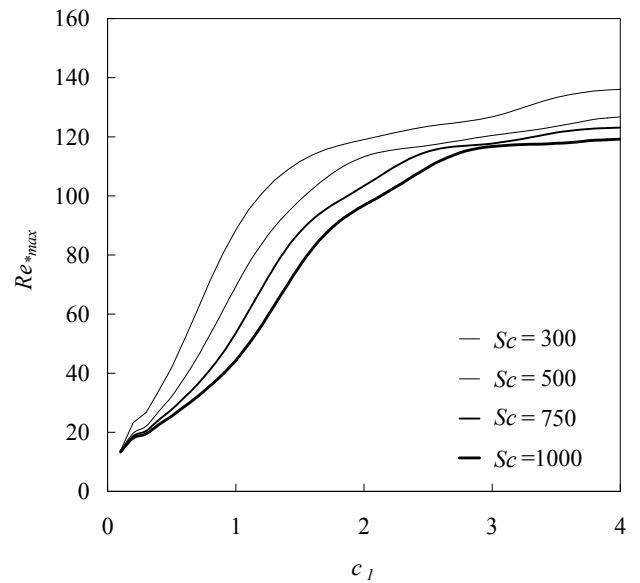


図-4 シュミット数をパラメーターとした場合の $c_1$ とスタントン数が最大値をとる粗さのレイノルズ数 $Re_{*max}$ との関係

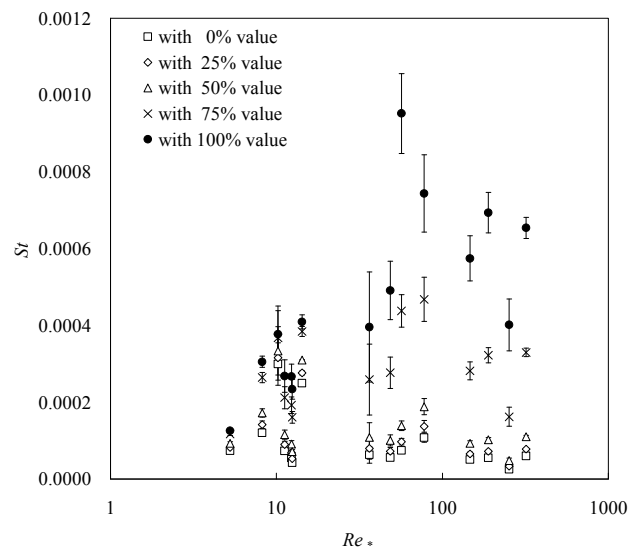


図-5 粗さのレイノルズ数と水・堆積物界面におけるDO濃度を段階的に過小評価した場合のスタントン数の計算結果との関係

さのレイノルズ数においてスタントン数は最大値を取る。シュミット数が大きいということは、運動量の拡散に比べて溶質の拡散が相対的に小さなことを示すため、スタントン数が最大値を取るためにはより大きな粗さのレイノルズ数が必要になるためと考えられる。

## 4. 考察

### 4.1 水・堆積物界面における DO 濃度推定の重要性

まずここでは、スタントン数の評価に対して、水・堆積物界面におけるDO濃度の定量的な推定がもつ重要性について議論する。水・堆積物界面におけるDO濃度は、水・堆積物界面直上における水理条件と堆積物表層（好気層）での生化学的な反応の両方の影響を受け受動的に決まるため、微小DO電極を用いた測定や上述のような水・堆積物界面近傍の詳細なモデル計算を用いない限りは、予め求めておくことが困難である。そのため一般的には、界面におけるDO濃度は0であると仮定することが多い（例えば、Dade 1993）。

図-5に、粗さのレイノルズ数と水・堆積物界面におけるDO濃度を段階的に過小評価した場合のスタントン数の計算結果との関係を示す。図中には、上記モデルにより計算された水・堆積物界面におけるDO濃度の0, 25, 50, 75, 100%の値を界面におけるDO濃度と仮定して計算されたスタントン数が記載されている。本計算においては、中村ら(1995)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を行った（付録G参照）。過小評価した界面におけるDO濃度を用いたどの計算においても、計算されたスタントン数は本モデルによるスタントン数よりも小さな値をとっている。これは単純に、水・堆積物界面におけるDO濃度を過小評価したことにより、式(5)の分母が実際よりも大きくなってしまったためである。

ここで、過小評価された水・堆積物界面におけるDO濃度を用いて計算されたスタントン数と本モデルにより得られるスタントン数との比を $\alpha_{St}$ と定義する。粗さのレイノルズ数と $\alpha_{St}$ との関係を図-6に示す（より詳細な結果については、付録Hに示す）。 $\alpha_{St}$ は粗さのレイノルズ数の増加に伴い、指数関数的に減少している様子が見て取れる。これは、基本的には粗さのレイノルズ数の増加は水・堆積物界面におけるDO濃度を増加させるため、粗面領域においてその過小評価の傾向が強まるためであると考えられる。本計算条件においては、 $\alpha_{St}$ は粗面領域において最低で6%にまで過小評価されることがわかった。

これらの計算結果から、 $\alpha_{St}$ は次式のような粗さのレイノルズ数の関数として定式化されることがわかった。

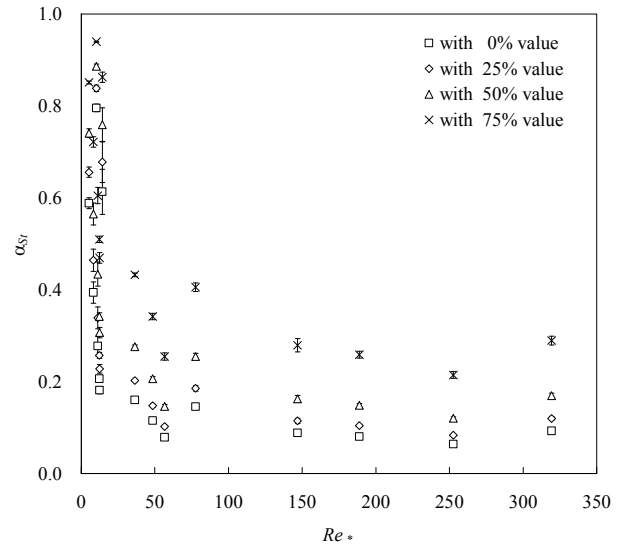


図-6 粗さのレイノルズ数と $\alpha_{St}$ との関係

$$\alpha_{St} = aRe_s^b \quad (20)$$

ここで、 $a$ および $b$ は次式のような水・堆積物界面におけるDO濃度の過小評価率 $C'_o(z=0)/C_o(z=0)$ の関数として定式化される。

$$a = -3.93 \left( \frac{C'_o(z=0)}{C_o(z=0)} \right)^4 + 5.61 \left( \frac{C'_o(z=0)}{C_o(z=0)} \right)^3 - 2.60 \left( \frac{C'_o(z=0)}{C_o(z=0)} \right)^2 + 0.75 \left( \frac{C'_o(z=0)}{C_o(z=0)} \right) + 1.17 \quad (21)$$

$$b = 1.98 \left( \frac{C'_o(z=0)}{C_o(z=0)} \right)^4 - 2.93 \left( \frac{C'_o(z=0)}{C_o(z=0)} \right)^3 + 1.56 \left( \frac{C'_o(z=0)}{C_o(z=0)} \right)^2 - 0.11 \left( \frac{C'_o(z=0)}{C_o(z=0)} \right) - 0.50 \quad (22)$$

式(20)を用いると、スタントン数の修正が可能となる。図-7に水・堆積物界面におけるDO濃度の過小評価率 $C'_o(z=0)/C_o(z=0)$ と $a$ および $b$ との関係を示す。

### 4.2 $c_f=1$ とした場合の理論解と実験結果との比較

以下では、上述の数理モデルから得られる理論解と中村ら(1995)より得られた実験結果との比較を行う。

図-8(a)は、Dade (1993)などに見られるように $c_f=1$ とした場合の理論解と実験結果との関係を示している。計算および実験条件については表-G.1を参照され

たい。これらの計算においては、 $R = kC_o(z=\infty)$  (すなわち、 $K_o = \infty$ ) と仮定している (以下同様とする)。

図-8(a)より、理論解は実験結果を約67.6%程度に過小評価しており、それらの相関も $R^2 = 0.409$ と再現性も低い結果となっていることがわかる。以下ではこれらの原因について検討する。

上記のモデル化において、唯一論理的な考察を元に決定されていないパラメーターとして、粗度要素間 (キャビティー内) の水塊の交換率にかかわる定数である $c_l$ の取り扱いが挙げられる。そこで以下の4.3節では、第一の問題として粗度要素間の水塊の交換率について合理的な定式化を試みる。

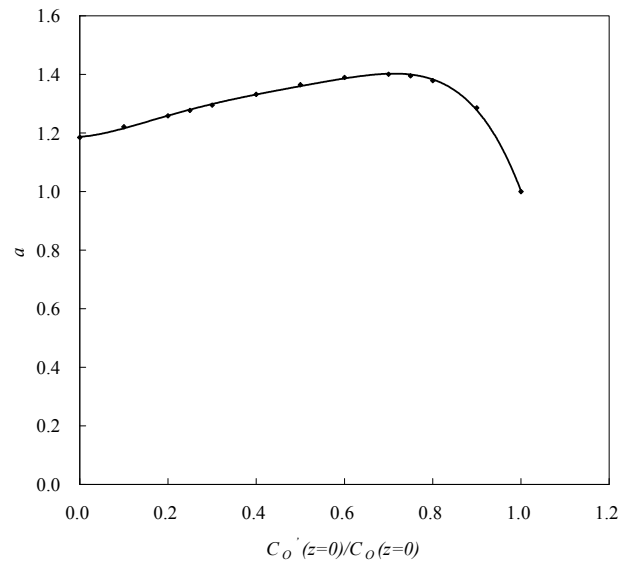
またもう一つの問題として、Inoue et al. (2000)により導入された、直上水中の溶存物質濃度の急激な変化は、水・堆積物界面における溶存物質輸送速度の増大を招くという、非定常現象に関する概念をモデル化していないことが挙げられる。そこで以下の4.4節では、第二の問題として、底面上に位置する粗度要素間の水塊交換直後における水・堆積物界面でのDO輸送速度の非定常的な変動の影響について検討する。

### 4.3 粗度要素間の水塊交換率の定式化

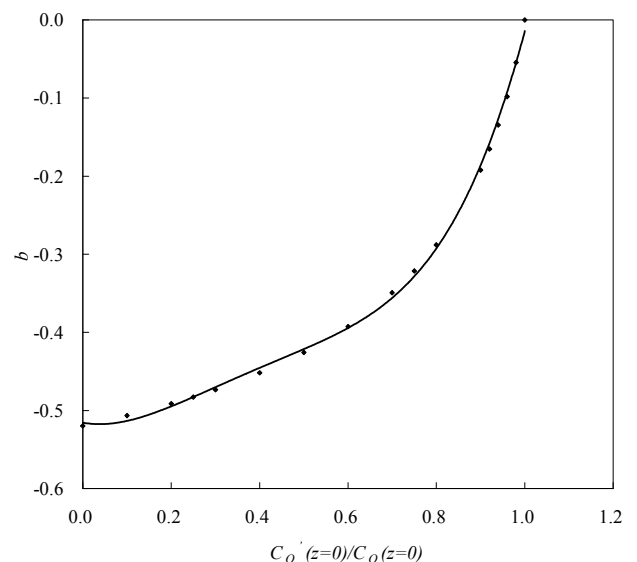
ここでは、第一の問題として考えられる、粗度要素間の水塊の交換率 (交換周期 $s$ ) について検討する。

Corino and Brodkey (1969)は固体壁面付近の乱流における流動測定を行なった。その結果、壁面近傍の粘性底層は小さなスケールの流速変動により継続的に乱されており、壁面の遠方から粘性底層内へと浸透する流体要素により周期的に更新されていることが明らかとなっている。このような現象は「表面更新説」として知られており、Danckwerts (1951)により初めて導入された概念である。粘性底層内から粘性底層外への流体要素の輸送は「バースト」、その逆は「イジェクション」と呼ばれ、壁面付近でおこる流動場を規定する非常に重要な現象であると考えられている

(Corino and Brodkey 1969)。また、流体要素交換の周期や回転時間は壁面における熱や物質輸送を支配する重要なパラメーターとなる。壁面が粗面である場合には、「バースト」または「イジェクション」と呼ばれる現象は”vortex shedding”という現象に取って代われ、これが壁面における熱や物質輸送を支配する重要なパラメーターとなる。本節では”vortex shedding”の発生周期 $s$ 、およびこれにかかわるパラメーターとしての $c_l$ について定量的な定式化による影響について検討する。Black (1968)は壁面近傍での乱流場



(a) aについて



(b) bについて

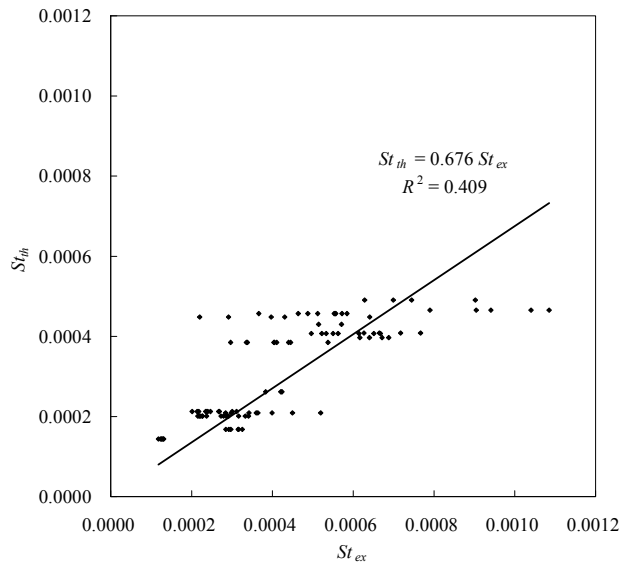
図-7 過小評価率 $C_o'(z=0)/C_o(z=0)$ と $a$ および $b$ との関係

において有用なスケール則を導入し、多数の実験結果からvortex sheddingの平均周波数について、その無次元量を定式化している。

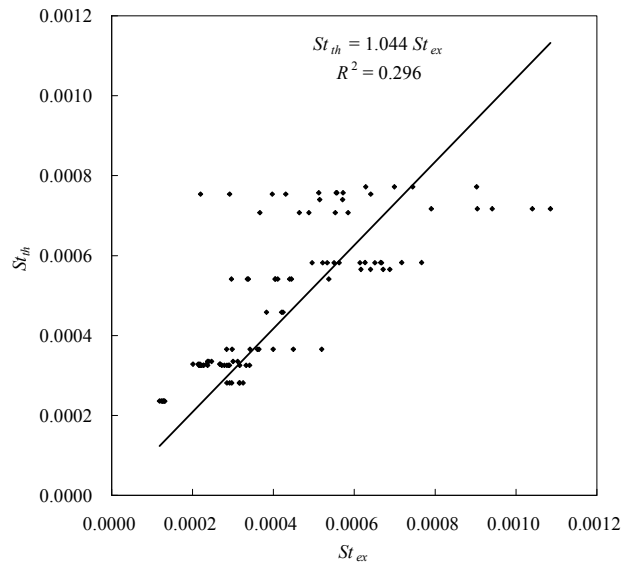
$$\frac{\omega V}{u_*^2} = \frac{2\pi V}{su_*^2} = 0.056 \quad (23)$$

ここで、 $\omega$ はvortex sheddingの平均各周波数を表す。

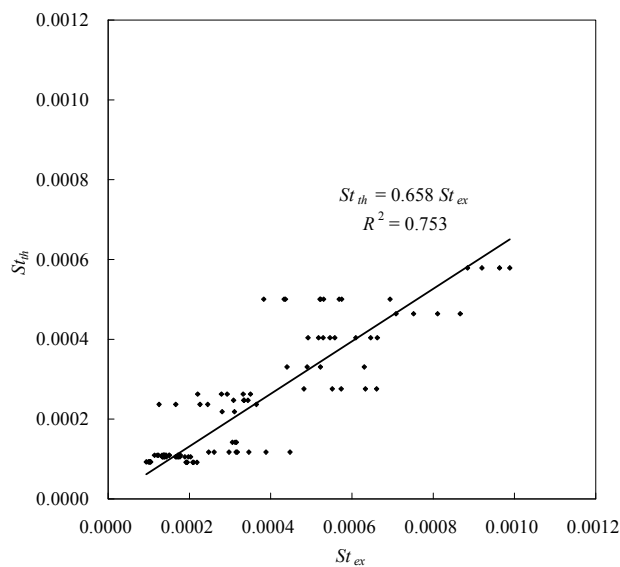
式(23)より $s$ が計算されるため、式(4)および(5)から水・堆積物界面におけるDOフラックスおよびスタントン数が計算できる。図-8(b)に式(23)により定量的に



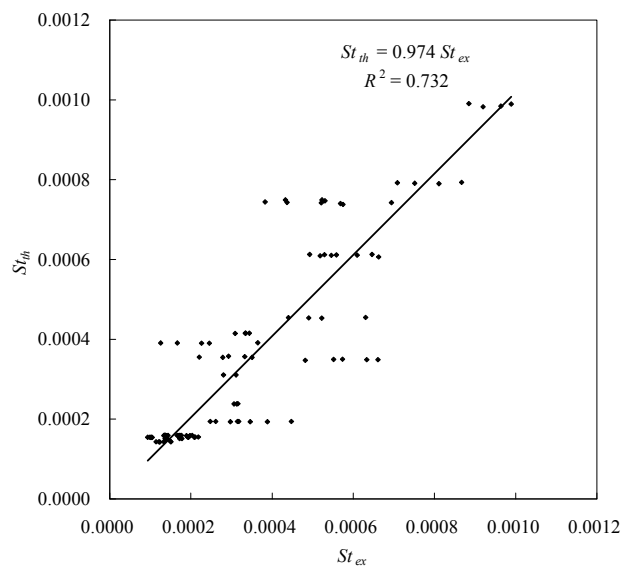
(a)  $c_l=1$ として非定常過程を考慮しない場合



(c)  $c_l=1$ として非定常過程を考慮した場合



(b) 水塊交換率を定式化し  
非定常過程を考慮しない場合



(d) 水塊交換率を定式化し  
非定常過程を考慮した場合

図-8 理論解と実験結果との比較

評価された $s$ を用いて計算された理論解と中村ら(1995)による実験結果との比較を示す。この場合でも、計算結果は実験結果の65.8%程度の値をとっており、依然として理論解は実験結果を過小評価する結果となっている。しかし、それらの関係における相関係数は $R^2 = 0.753$ となっており、この点についてはかなりの改善がみられる。

この結果より、図-8(a)にみられたような理論解と実験結果とのばらつきは、上述のモデル化の過程におい

て粗度要素間の水塊交換の周期(vortex sheddingの発生周期)を合理的な考察の元に決定していなかったことが原因であると結論した。なお、この $s$ の評価式を用いて式(4)と(5)を比較することで、 $c_l$ については簡単な粗さのレイノルズ数の関数として表すことが可能となる。

$$c_l = 0.094 Re_*^{1/2} \quad (24)$$

式(24)から計算された、各理論解の計算条件に対する $c_l$ の値は表-G.1に示している。

#### 4.4 vortex shedding 直後の非定常過程

Inoue et al. (2000)は、直上水中の溶存物質濃度の急変直後における、水・堆積物界面での物質輸送速度の非定常的な変動について、鉛直方向の拡散方程式を基礎とした数値モデルにより検討している。そしてその結果、溶存物質濃度の急変から定常状態へと遷移する期間中、そのような非定常過程により水・堆積物界面における物質輸送速度は大幅に増大することを指摘している。そこで、ここではInoue et al. (2000)により示された非定常的な溶存物質濃度分布の変動が物質輸送速度を大幅に増大するという概念を、vortex sheddingにより断続的に水塊の更新が起こる粗度要素間のキャビティーに対して適用し、そのような非定常過程が水・堆積物界面における物質輸送速度に与える影響について議論する。

まず、壁面摩擦により発生した渦は、境界層内部の水塊の内、壁面からある一定の距離以上の水塊を更新するものと仮定する。ここではこの距離を拡散境界層厚さ $\delta_d$ の $\beta$ 倍と仮定し、壁面から $\beta\delta_d$ 以上にある水塊が更新されるものとする。ここで $\beta$ は $0 < \beta < 1$ の値をとるものとする。拡散境界層厚さ $\delta_d$ の計算についてはいくつかの推奨された定式化が存在するが、ここではDade (1993)などが提案している一般的な次式により求めることとする。

$$\delta_d = 10 \frac{V}{u_*} Sc^{-0.33} \quad (25)$$

一方、vortex sheddingの発生周期 $s$ は、式(23)より、簡単な摩擦速度の関数として次式により与えられる。

$$s = 112 \frac{V}{u_*^2} \quad (26)$$

以下の計算で用いられた拡散境界層厚さ $\delta_d$ とvortex sheddingの発生周期 $s$ については、表-G. 1に示している。

Dworak and Wendt (1977)によると、壁面摩擦により発生した渦は境界層内の水塊を更新するが、その範囲は壁面からの距離が拡散境界層厚さ $\delta_d$ の30-50%の位置より上部であると結論している。そこで本稿では、壁面からの距離が拡散境界層厚さ $\delta_d$ の40%の位置より上部が壁面摩擦により発生した渦により更新されるものと考え、 $\beta = 0.4$ として計算を行った。

本節ではこれらの値を用い、また $c_1 = 1$ とした場合の、vortex shedding発生直後のから次のvortex sheddingが発生するまでの期間 $s$ についての非定常計算の結果を示す。vortex sheddingの発生周期 $s$ を計算した場合には、 $c_1$ についても式(24)により定量的に評価することが可能である。しかし、本節においてはvortex sheddingの発

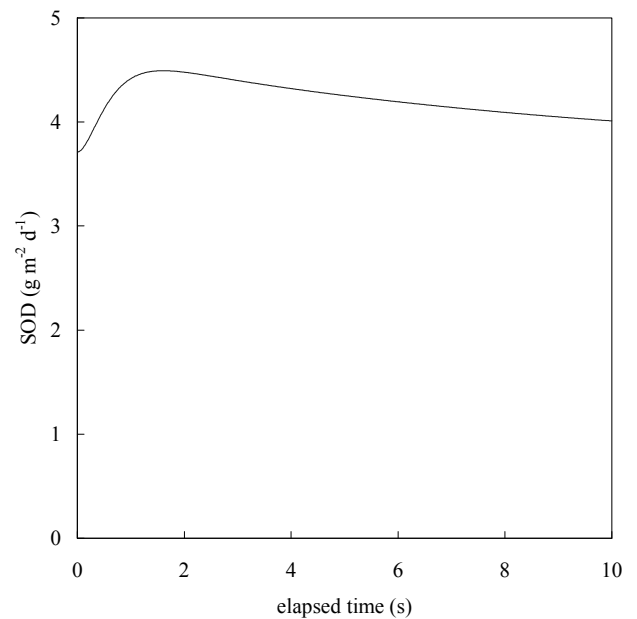


図-9 vortex shedding発生直後のSODの変動

生周期 $s$ を定量的に評価することによる効果と、vortex sheddingの発生直後の非定常過程を考慮することによる効果を区別して評価することを目的として、ここでは $c_1 = 1$ を採用することとする。これら双方を取り入れた計算結果については次節で示すこととする。

これらの計算においては、まずそれぞれの計算条件に対する定常解を求めておく。その後、そこから得られたDO濃度分布の定常解の内、壁面からの距離が拡散境界層厚さ $\delta_d$ の40%の位置より上部については、バルク領域のDO濃度で置換したものを、DO濃度分布の初期条件として与えた。

このような条件を元に、vortex shedding発生から次のvortex sheddingが発生するまでの期間 $s$ について行った非定常計算の結果の一例を図-9に示す。中村ら(1995)の実験条件に対して計算された、他の計算結果については付録1に記載する。この計算条件下においては、SODはvortex shedding発生から約1.5秒後に、約1.2倍の大きさにまで増大していることがわかる。このようなvortex shedding発生後の初期段階におけるSODの単調な増加は、 $z > \beta\delta_d$ における水塊の更新に伴う急激な拡散によるDO供給の増加によるものである。これはvortex shedding発生直後の限られた期間に起こる一時的な現象であり、その時間スケール $\tau_{di}$ は次式により定式化される。

$$\tau_{d1} = \frac{(\beta\delta_d)^2}{D_{zm} + D_{z1}} = \frac{100\beta^2\nu^2 Sc^{-0.67}}{D_{zm}u_*^2 + 250K\beta^3\nu_*^2 Sc^{-1}} \quad (27)$$

ここで、 $\overline{D_{z1}}$ は $0 < z < \beta\delta_d$ の範囲において鉛直方向に平均された乱流拡散係数を示す。

その後、vortex shedding発生後の初期段階におけるSODの増加とは対照的に、SODは単調な減少傾向に転じる。この減少は、拡散境界層が発達していく過程において、 $0 < z < \beta\delta_d$ の範囲におけるDO濃度勾配が徐々に緩やかになっていくためである。この減少も、拡散境界層が発達するまでの一時的な現象であり、この時間スケール $\tau_{d2}$ は次式により定式化される。

$$\tau_{d2} = \frac{\delta_d^2}{D_{zm} + D_{z2}} = \frac{100\nu^2 Sc^{-0.67}}{D_{zm}u_*^2 + 250K\nu_*^2 Sc^{-1}} \quad (28)$$

ここで、 $\overline{D_{z2}}$ は $0 < z < \delta_d$ の範囲において鉛直方向に平均された乱流拡散係数を示す。各計算条件に対して得られた $\tau_{d2}$ および $\tau_{d1}$ は表-G.1に示している。

これらの計算結果から得られた、vortex shedding発生から次のvortex sheddingが発生するまでの期間 $s$ におけるSODの平均値、および中村ら(1995)による実験結果との比較を図-8(c)に示す。この場合、計算結果は平均的に実験結果を4.4%程度過大評価する結果となっているが、図-8(a)または(b)にみられた計算結果と比較して、その定量的評価においては著しく改善された結果となっている。しかし、それらの関係における相関係数は $R^2 = 0.296$ となっており、この点については依然として改善がみられない。

この結果より、図-8(a)または(b)にみられたような理論解の量的な過小評価は、上述のモデル化の過程においてvortex sheddingの発生直後における拡散輸送速度の非定常過程に関する考察を行っていなかったことが原因であると結論した。

#### 4.5 水塊の交換率の定式化と vortex shedding 直後の非定常過程との組み合わせ

上記までの考察を元に、vortex sheddingの発生周期 $s$ を式(26)で定量的に評価し、さらにvortex shedding発生から次のvortex sheddingが発生するまでの期間における非定常過程も考慮して行った計算結果と中村ら(1995)による実験結果との比較を図-8(d)に示す。これを見ると、計算結果は実験結果を良く再現していることがわかる。図-8(a)または(b)においてみられた計算結果の過小評価傾向は改善されており、その平均的な誤差は2.6%となっている。さらに、図-8(a)または(c)

においてみられた、理論界のばらつきについても改善がみられ、相関係数は $R^2 = 0.732$ となっている。

これらの考察により、理論解による実験結果の再現性は、粗度要素間のキャビティ内における水塊の交換率を定量的に評価すること、およびその水塊交換により直上水のDO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、著しく改善されることがわかった。

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を図-10に示す。この変動については、以下のように説明できる。

1. vortex shedding発生前においては、拡散境界層は発達している状態に近い状態にある。水・堆積物界面におけるDO濃度の勾配は比較的緩やかで、界面におけるDOの拡散輸送速度も比較的小さい値をとる(図-10(a))。

2. vortex shedding発生直後においては、 $z > \beta\delta_d$ における水塊は更新され、そこでのDO濃度はバルク領域における濃度となっている。水・堆積物界面におけるDO濃度の勾配は一時的に急になっており、そこでのDO拡散輸送速度は一時的に大きな値となる(図-10(b))。

3. その後、拡散境界層は発達し、その厚みを増していく。それに伴い、水・堆積物界面におけるDO濃度勾配は次第に緩やかになり、そこでのDO拡散輸送は定常状態でのそれに近づいていく(図-10(c))。

図-9においてみられた、vortex sheddingの発生直後にみられるDOの拡散輸送(SOD)の非定常的な変動は、このようなvortex sheddingの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より説明することができる。このような概念は、固相・液相間での熱・物質輸送に関する他のモデル化においても有用であると考えられる。

#### 4.6 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難い。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-11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)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

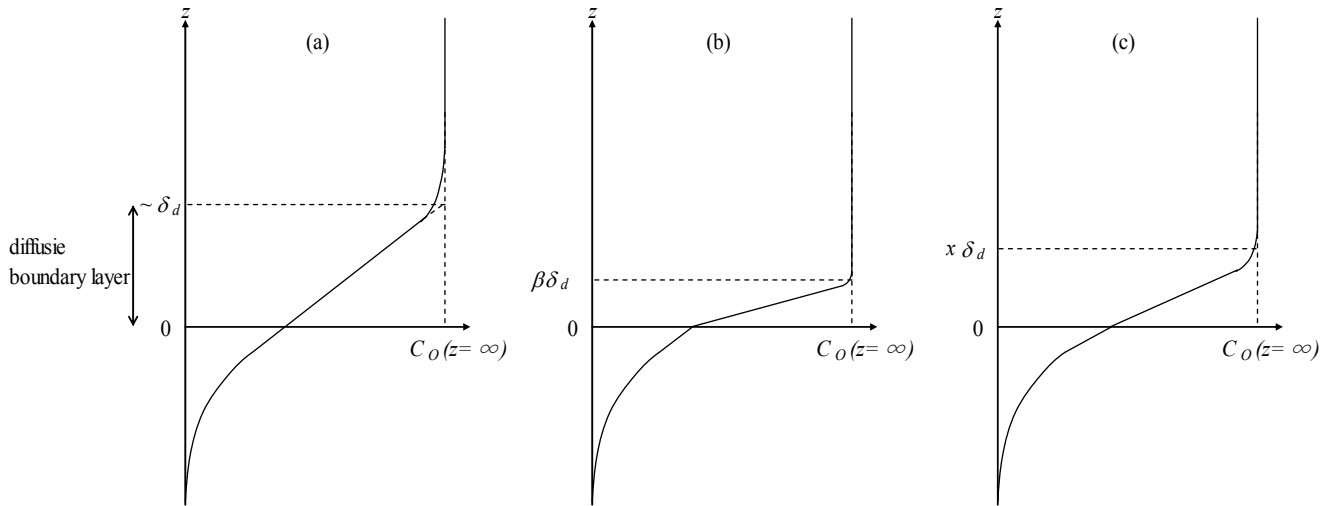


図-10 vortex shedding発生前後における、水・堆積物界面近傍でのDO濃度の鉛直分布の非定期的な変動についての概念図

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-11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。

$$F = 0.037u_*^2 - 0.241u_* + 1.805 \quad (0.2 \text{ cm s}^{-1} < u_* < 3.6 \text{ cm s}^{-1}) \quad (29)$$

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(29)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. あとがき

本稿では、水理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、既存の実験結果との比較を行った。理論モデルから得られた結果では、定性的にはスタントン数は既に報告があるような、一般的な傾向を示していた。すなわち、粗さのレイノルズ数が比較的小さい範囲である滑面の領域では、粗さのレイノルズ数の増加に伴いスタントン数も単調に増加する傾向がみられた。さらに粗さのレイノルズ数が増加して粗滑遷移

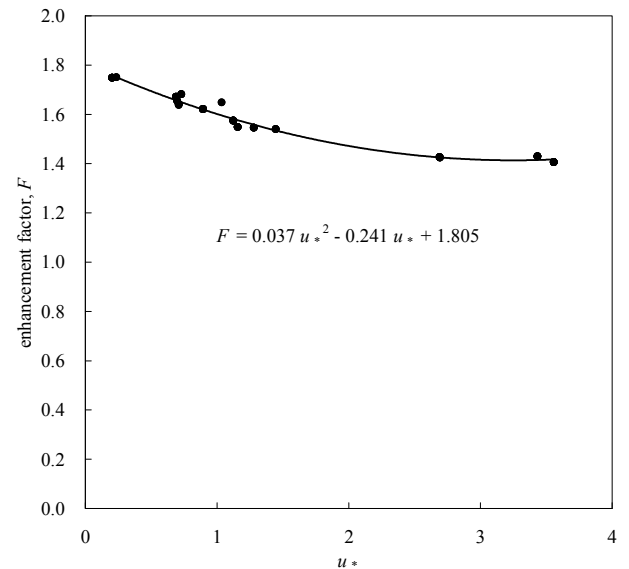


図-11 摩擦速度と非定常過程を考慮することによるスタントン数の増幅係数 $F$ との関係

領域になると、スタントン数は最大値をとる。しかし、粗さのレイノルズ数がさらに増加した完全粗面領域では、スタントン数は粗さのレイノルズ数の増加に伴い単調に減少する。このような傾向は、これまでに主に化学工学の熱・物質輸送の分野において得られてきた、粗面上での知見と定性的には同じものである。しかし本稿では、DOの拡散輸送に関するスタントン数の評価に対しては、水・堆積物界面におけるDO濃度の定量的な評価が必要であることが示された。この界面におけるDO濃度の定量評価は粗さのレイノルズ数が大



きくなるほど重要になり、このような評価を行わなかった場合は、完全粗面においては約6%にまで過小評価することが示された。このような界面における対象物質の濃度や温度の定量的評価は、これまでの既存のモデルではなされておらず、本稿によりその重要性が明らかとなった。これらの結果から、DOのような反応性のある物質について検討を行う場合には、液相における拡散輸送過程と固相中での生化学的な過程を組み合わせることでモデル化を行うことが必要不可欠であることが示された。

さらに、粗度要素間のキャビティー内における水塊の交換 (vortex shedding) の発生周期、および水塊の交換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もまた、共に重要な現象であることが示された。vortex sheddingの発生周期を定量的に評価することは、スタントン数を計算する上で、そのばらつきを低減させることに対して有効である。また、非定常過程を考慮に入れることにより、拡散輸送速度の増幅効果を再現することが可能となり、より精度の高い評価には必要不可欠な概念であることが示された。

(2008年11月7日受付)

#### 参考文献

- 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, Vol. 42, pp. 1046-1050.
- 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, Vol. 2, pp. 83-92.
- Arega, F. and Lee, J. H. W. (2005): Diffusional mass transfer at sediment-water interface of cylindrical sediment oxygen demand chamber, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 131, pp. 755-766.
- Bakker, J. F. and Helder, W. (1993): Skagerrak (northeastern North Sea) oxygen microprofiles and porewater chemistry in sediments, *Marine Geology*, Vol. 111, pp. 299-321.
- Belanger, T. (1981): Benthic oxygen demand in lake Apopka, Florida, *Water Research*, Vol. 15, pp. 267-274.
- Berg, P., Roy, H., Janssen, F., Meyer, V., Jørgensen, B. B., Huettel, M. and de Beer, D. (2003): Oxygen uptake by aquatic sediments measured with a novel non-invasive eddy-correlation technique. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 261, pp. 75-83.
- Berner, R. A. (1980): Diagenetic physical and biological processes, in *Early Diagenesis* (ed. Berner, R. A.), Princeton University Press, pp. 15-56.
- Bilger, R. W. and Atkinson, M. J. (1992): Anomalous mass transfer of phosphate on coral reef flats, *Limnology and Oceanography*, Vol. 37, pp. 261-272.
- Boudreau, B. P. (1997): *Diagenetic Models and Their Implementation*. Springer-Verlag.
- Boudreau, B. P. (2001): Solute transport above the sediment-water interface, in *The Benthic Boundary Layer: Transport Processes and Biogeochemistry* (ed. Boudreau, B. P. and Jørgensen, B. B.), Oxford University Press, pp. 104-126.
- Corino, E. R. and Brodkey, R. S. (1969): A visual investigation of wall region in turbulent flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 37, pp. 1-30.
- Dade, W. B. (1993): Near-bed turbulence and hydrodynamic control of diffusional mass transfer at the sea floor, *Limnology and Oceanography*, Vol. 38, pp. 52-69.
- Dawson, D. A. and Trass, O. (1972): Mass transfer at rough surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 1317-1336.
- Dipprey, D. F. and Sabersky, R. H. (1963): Heat and momentum transfer in smooth and rough tubes at various prandtl numbers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 6, pp. 329-352.
- Falter, J. L., Atkinson, M. J. and Coimbra, C. F. M. (2005): Effects of surface roughness and oscillatory flow on the dissolution of plaster forms: Evidence for nutrient mass transfer to coral reef communities, *Limnology and Oceanography*, Vol. 50, pp. 246-254.
- Forster, S., Huettel, M. and Ziebis, W. (1996): Impact of boundary layer flow velocity on oxygen utilisation in coastal sediments, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 143, pp. 173-185.
- Glud, R. N., Gundersen, J. K., Jørgensen, B. B., Revsbech, N. P. and Schulz, H. D. (1994): Diffusive and total oxygen uptake of deep-sea sediments in the eastern South Atlantic Ocean: in situ and laboratory measurements, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Vol. 41, pp. 1767-1788.
- Grant, W. D. and Madsen, O. S. (1986): The continental-shelf bottom boundary layer, *Annual*

Review of Fluid Mechanics, Vol. 18, pp. 265-305.

Inoue, T., Nakamura, Y. and Adachi, Y. (2000): Non-steady variations of SOD and phosphate release rate due to changes in the quality of the overlying water, *Water Science and Technology*, Vol. 42, pp. 265-272.

Nakamura, Y. and Stefan, H. G. (1994): Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: Theory, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 120, pp. 996-1016.

Revsbech, N. P. and Jørgensen, B. B. (1986): Microelectrodes: Their use in microbial ecology, in *Advances in Microbial Ecology* (ed. Marshall, K. C.), Plenum. Pub. Corp., pp. 293-352.

Røy, H., Huettel, M. and Jørgensen, B. B. (2005): The influence of topography on the functional exchange surface of soft sediments, assessed from sediment topography measured in situ, *Limnology and Oceanography*, Vol. 50, pp. 106-112.

Santschi, P. H., Bower, P., Nyffeler, U. P., Azevedo, A. and Broecker, W. S. (1983): Estimates of the resistance to the chemical transport posed by the deep-sea boundary layer, *Limnology and Oceanography*, Vol. 28, pp. 899-912.

Slomp, C. P., Malschaert, J. F. P. and Raaphorst, W. V. (1998): The role of adsorption in sediment-water exchange of phosphate in North Sea continental margin sediment, *Limnology and Oceanography*, Vol. 43, pp. 832-846.

Steinberger, N. and Hondzo, M. (1999): Diffusional mass transfer at sediment-water interface, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 125, pp. 192-200.

Yaglom, A. M. and Kader, B. A. (1974): Heat and mass transfer between a rough wall and turbulent fluid flow at high reynolds and pecllet numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 62, pp. 601-623.

Zhao, W. and Trass, O. (1997): Electrochemical mass transfer measurements in rough surface pipe flow: geometrically similar V-shaped grooves, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 2785-2797.

## 付録

### 付録 A シュミット数および乱流シュミット数

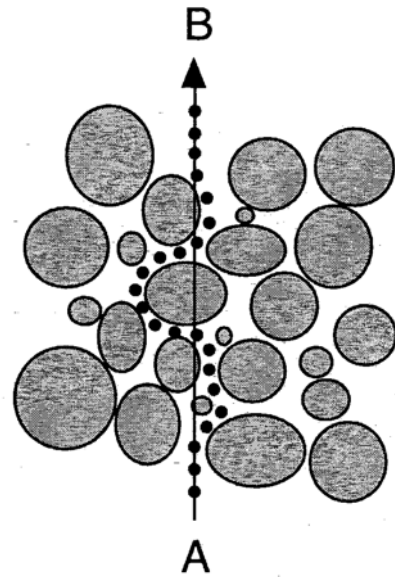


図-B.1 tortuosityの概念図 (Boudreau 1997より)

シュミット数 $Sc$ および乱流シュミット数 $Sc_t$ はそれぞれ粘性係数と拡散係数との比を表す指標であり、個々の定義は以下の通り。

$$Sc = \frac{\nu}{D_m} \quad (\text{A.1})$$

$$Sc_t = \frac{\nu_t(z)}{D_{zt}(z)} \quad (\text{A.2})$$

### 付録 B 堆積物中の見かけの拡散係数

間隙水中の拡散は分子拡散によるものであるが、堆積物粒子の存在 (tortuosity) により拡散係数の補正が必要となる。tortuosityとは、間隙水中を拡散移動する物質が堆積物粒子の存在により直線的に移動することができず、蛇行しながら移動する効果をいう (図-B.1参照)。tortuosityは次式により表される (Berner 1980)。

$$\theta = \frac{dl}{dz} \quad (\text{B.1})$$

ここで、 $\theta$ はtortuosity、 $dl$ は深さ方向に $dz$ 移動する際の実際の経路の長さを表す。また、堆積物全体に対する分子拡散係数は、次式により表される (Berner, 1980)。

$$D_s = \frac{D_m}{\theta^2} = \frac{1}{\phi f} D_m \quad (\text{B.2})$$

ここで、 $D_s$ は堆積物全体に対する分子拡散係数、 $\phi$ は間隙率、 $f$ はFormation Factorを表す。Formation Factorと間隙率との間には、堆積物一般に広く適用可能な次式が提案されている (Manheim, 1970)。

$$F = \phi^{-n} \quad (\text{B.3})$$

砂または砂礫質の堆積物に対しては $n = 2$ が良く適用され、Archie則として知られている (Berner, 1980). 砂泥質の堆積物に対しては $n = 2-3$ の範囲で変動するが、一般的には $n = 2.5$ とすることが多い.

### 付録 C ダムケラー数

Boudreau 2001によると、定常条件下における反応項 (DO消費項) を含む無次元化された拡散方程式は式 (C.1)により表される.

$$\frac{d}{dZ} \left\{ \Delta(z) \frac{dC_o}{dZ} \right\} - \frac{r\delta^2}{D_{z\max}} C_o = 0 \quad (C.1)$$

$$Z = \frac{z}{\delta} \quad (C.2)$$

$$\Delta(z) = \frac{D_{zm} + D_{zt}(z)}{D_{z\max}} \quad (C.3)$$

ここで、 $r$ は水中におけるDO消費に関する反応速度係数、 $D_{z\max}$ は境界層内における乱流拡散係数の最大値を表す.

式(B.1)の左辺第二項の無次元反応速度係数がダムケラー数 (Damkohler number,  $Da$ ) であり、次式により定義される.

$$Da = \frac{r\delta^2}{D_{z\max}} \quad (C.4)$$

ダムケラー数が十分に小さいとき (0.1以下のとき) は、拡散に比べて反応項は小さく、DO消費は無視できる. これに対し、ダムケラー数が大きいとき (10以上のとき) は、拡散に比べて反応項は大きく、DO消費が主たる支配過程となる.

### 付録 D 拡散境界層中でのスタントン数の導出

まず、水平方向には流動条件及び溶質濃度は一定と仮定すると、水中での鉛直方向の拡散輸送速度 $J$ は次式の一次元拡散方程式で表現できる.

$$J = -(D_{zm} + D_{zt}(z)) \frac{dC(z)}{dz} \quad (D.1)$$

ここで、乱流シュミット数 $Sc_t$ を1と仮定し、 $D_{zt}(z)$ の鉛直分布は次式により与えるものとする (Dade 1993).

$$D_{zt+} = \frac{\left\{ \kappa z_+ \left( 1 - \frac{z_+}{\delta_+} \right)^2 - 2 \right\} + \left[ \left\{ \kappa z_+ \left( 1 - \frac{z_+}{\delta_+} \right)^2 - 2 \right\}^2 - 4 \right]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (at\ z_+ > 10) \quad (D.2)$$

$$D_{zt+} = \kappa z_+^3 \quad (at\ z_+ < 10) \quad (D.3)$$

式(D.2)および(D.3)を用いて、式(D.1)について水・堆積物界面 ( $z = 0$ ) からバルク領域 ( $z = \infty$ ) まで鉛直方向に積分すると、バルク領域における溶質濃度と水・堆積物界面における溶質濃度との差が次式の無次元量により表現される.

$$C_+ = \frac{1}{J_{0+}} + A(z_+) = \frac{1}{J_+} \quad (D.4)$$

ここで、

$$C_+ \equiv \frac{u_* \{ C(z_+) - C(z_+ = 0) \}}{-J} \quad (D.5)$$

$$\frac{1}{J_{0+}} \equiv \frac{u_* \{ C(z_+ = z_{0+}) - C(z_+ = 0) \}}{-J} = \int_0^{z_{0+}} \frac{1}{\left( \frac{1}{Sc} + \frac{D_{zt+}}{\nu} \right)} dz_+ \quad (D.6)$$

$$A(z_+) \equiv \frac{u_* \{ C(z_+) - C(z_+ = z_{0+}) \}}{-J} = \int_{z_{0+}}^{z_+} \frac{1}{\left( \frac{1}{Sc} + \frac{D_{zt+}}{\nu} \right)} dz_+ \quad (D.7)$$

次に、Dipprey and Sabersky (1963)が提唱したcavity vortex theoryを元に、粗面上の水理条件を考慮した溶質の拡散輸送についての定式化を行う. Dipprey and Sabersky (1963)の理論によると、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semi-stagnant filmを通過する物質輸送フラックス $J$ は次式で表現される.

$$-J = \left( \frac{D_{zm}}{s} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta C \quad (D.8)$$

ここで、 $\Delta C$ はsemi-stagnant film内の溶質濃度とバルク領域の溶質濃度との差を表す. ここで溶質の濃度差 $\Delta C$ は次式で表すことができる.

$$\Delta C = C(z_+ = z_{0+}) - C(z_+ = 0) \quad (D.9)$$

式 (D.8) に式 (D.9) を代入することにより、semi-stagnant filmを通過する物質輸送フラックス $J$ が得られる. Dade (1993)ではsemi-stagnant film内の水塊が更新する周期 $s$ を直接的には用いずに、その周期に関連する定数を $c_1$ として物質輸送フラックス $J$ について次式を得ている.

$$-J = c_1 \left( \frac{D_{zm} u_*}{k_s} \right)^{\frac{1}{2}} \{ C(z_+ = z_{0+}) - C(z_+ = 0) \} \quad (D.10)$$

次に、式(D.6)と式(D.10)を比較することで、粗面境界での無次元化された拡散フラックスを表す式が得られる。

$$J_{0+} = c_1 (\text{Re}_* \cdot \text{Sc})^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{D.11})$$

水・堆積物界面における拡散フラックス $J$ は、しばしば無次元化された Stanton 数 (Stanton number,  $St$ ) として表現される。無次元化はバルク領域の平均流速 $\bar{u}$ 、バルク領域における溶質濃度 $C(z=\infty)$ 、水・堆積物界面における溶質濃度 $C(z=0)$ を用いて行われ、式(D.12)のように表される。

$$St = \frac{-J}{u\{C(z=\infty) - C(z=0)\}} \quad (\text{D.12})$$

ここで、底面抵抗係数 $C_f$ を(D.13)で定義すると、式(D.4)、(D.5)および(D.12)より $St$ は式(D.14)で表される。

$$C_f \equiv 2 \left( \frac{u_*}{u} \right)^2 \quad (\text{D.13})$$

$$St = \left( \frac{C_f}{2} \right)^{\frac{1}{2}} J_+ \quad (\text{D.14})$$

Dade (1993)の手法を水・堆積物界面におけるDOの拡散輸送に適用すると、式(D.4)、(D.10)および(D.14)から次式が得られる。

$$St = \frac{SOD}{u\{C_o(z=\infty) - C_o(z=0)\}} = \left( \frac{C_f}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{(\text{Re}_* \cdot \text{Sc})^{\frac{1}{2}}}{c_1} + A(z_+ = \infty) \right\}^{-1} \quad (\text{D.15})$$

#### 付録 E R の定式化

Nakamura and Stefan (1994)は堆積物中の酸素消費について、化学的反応による酸素消費と生物的呼吸による酸素消費に分け、モデル化している。

化学的反応は水・堆積物界面におけるDO濃度 $C_o(z=0)$ の一次オーダーの反応として定式化している。また、生物的呼吸についてはモノー型で表現している。これらから、単位体積当たりの堆積物による酸素消費速度 $R$ は以下のように表される。

$$R = \mu \frac{C_o(z=0)}{K_o + C_o(z=0)} + kC_o(z=0) \quad (\text{E.1})$$

ここで、 $\mu$ は生物による最大呼吸速度、 $K_o$ は生物の呼吸に関する半飽和定数、 $k$ は一次オーダーの化学反応速度定数を表す。



写真-F.1 Rの測定の様子

#### 付録 F R の測定

細井ら(1992)は単位体積当たりの堆積物による酸素消費速度 $R$ について、以下の手法により測定することを提案している。即ち、フラン瓶等の密閉できるガラス容器に堆積物と飽和酸素濃度付近に調整した採泥現場付近の底層水を入れる。ガラス容器内部には攪拌子も投入し、DOメーターのセンサー部の設置も行う。実験時には装置全体を所定の温度で保管する。また、内部をスターラーで攪拌しながら、底層水を堆積物で懸濁させた状態を保つ(写真-F.1参照)。この状態でガラス瓶内部のDO濃度の変化を測定するが、濃度変化が激しい場合は約10分間隔で、濃度変化が緩やかな場合は1時間から数時間毎に濃度を測定する。これに加えて、空試験として底層水だけの試験も実施する。得られたDO濃度の時間変化の様子から、空試験の結果を踏まえて補正し、 $R$ の計算を行う。

#### 付録 G 理論との比較に用いた実験

中村ら(1995)は、水・堆積物界面における物質移動速度に及ぼす底面粗度の影響を検証する目的で、循環式管路を用いた実験を行っている。彼らの実験においては、長さ2.5 m、高さ15 cm、幅12.5 cmの矩形断面を持つ管路において、水路床の中央部に設けられた長さ100 cm、深さ10 cmの窪みに現場より採取された堆積物を敷き詰めることができる。管路は密閉されており、外気との接触はなく、DOのような管路内の水中の溶存物質の収支をとることができる。管路内の水はボ

表-G.1 実験条件一覧

roughness (mm)	$C_o(z=\infty)$ (mmol L <sup>-1</sup> )	$\bar{u}$ (cm s <sup>-1</sup> )	$u^*$ (cm s <sup>-1</sup> )	$k_s$ (cm)	$\delta_d$ (mm)	$s$ (s)	$c_1$	$\tau_{d1}$ (s)	$\tau_{d2}$ (s)
none	0.15 ~ 0.18	3.7	0.7	0.09	0.17	1.78	0.27	1.74	8.76
none	0.13 ~ 0.20	5.6	0.7	0.10	0.18	1.90	0.27	1.85	9.31
none	0.13 ~ 0.23	7.0	0.9	0.10	0.14	1.13	0.31	1.10	5.54
none	0.17 ~ 0.20	9.0	1.1	0.09	0.11	0.71	0.33	0.70	3.50
none	0.16 ~ 0.21	10.4	1.3	0.08	0.10	0.55	0.33	0.54	2.70
3	0.17 ~ 0.20	1.2	0.2	0.40	0.60	21.8	0.30	21.3	107
3	0.21 ~ 0.23	3.1	0.7	0.45	0.17	1.85	0.59	1.80	9.07
3	0.18 ~ 0.22	5.0	1.1	0.55	0.11	0.71	0.83	0.70	3.50
3	0.18 ~ 0.19	6.2	1.0	0.26	0.12	0.84	0.55	0.82	4.13
3	0.20 ~ 0.25	9.3	2.7	0.95	0.05	0.12	1.68	0.12	0.61
3	0.16 ~ 0.22	9.4	3.4	0.34	0.04	0.08	1.14	0.07	0.37
5	0.24 ~ 0.25	1.2	0.2	0.48	0.52	16.2	0.35	15.8	79.6
5	0.22 ~ 0.24	3.5	0.7	0.40	0.17	1.70	0.57	1.66	8.32
5	0.19 ~ 0.22	4.8	1.2	0.34	0.11	0.67	0.66	0.66	3.30
5	0.19 ~ 0.23	7.1	1.4	0.31	0.08	0.43	0.71	0.42	2.11
5	0.20 ~ 0.23	7.6	2.7	0.56	0.05	0.12	1.29	0.12	0.61
5	0.17 ~ 0.21	11.3	3.6	0.57	0.03	0.07	1.49	0.07	0.35

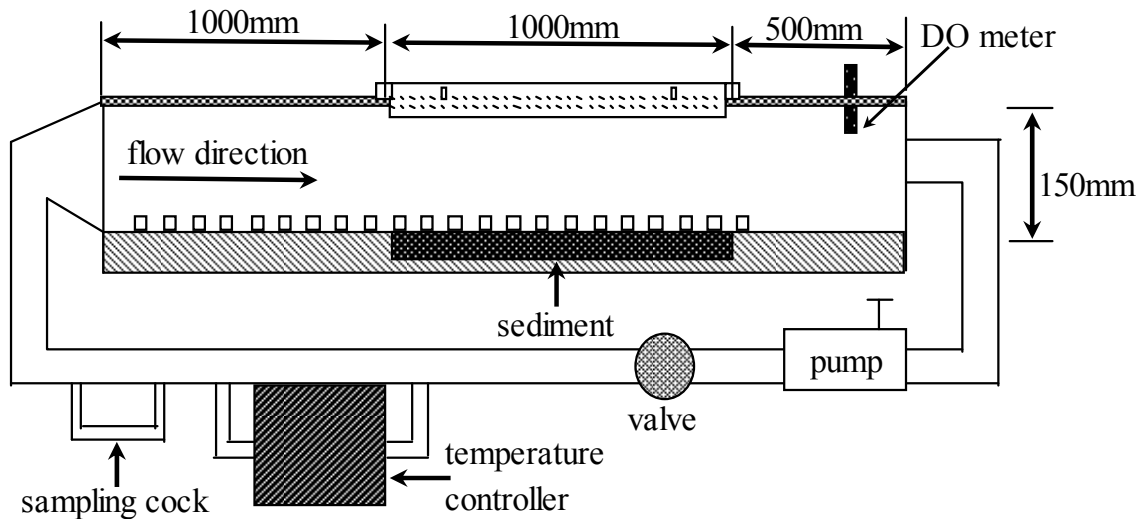


図-G.1 実験装置概念図

ンプにより循環させることができ、ポンプの回転速度を制御することで管路内の流速を変化させることもできる。さらに、水路床に3 mm角、または5 mm角の亚克力棒を設置することにより、積極的に粗度条件を変化させている(図-G.1参照)。本稿において参照した実験条件を表-G.1に示す。

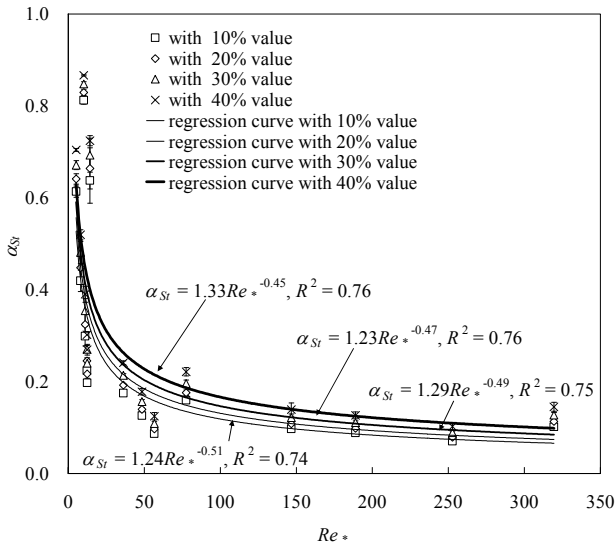


図-H.1  $0.1 \leq C_O'(z=0)/C_O(z=0) \leq 0.4$

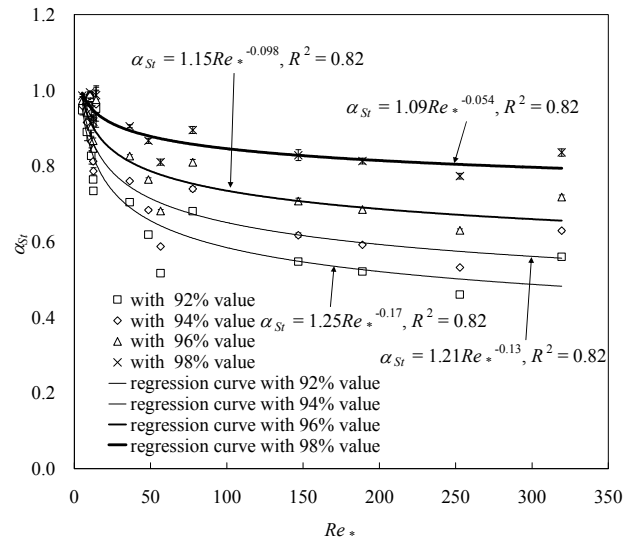


図-H.3  $0.92 \leq C_O'(z=0)/C_O(z=0) \leq 0.98$

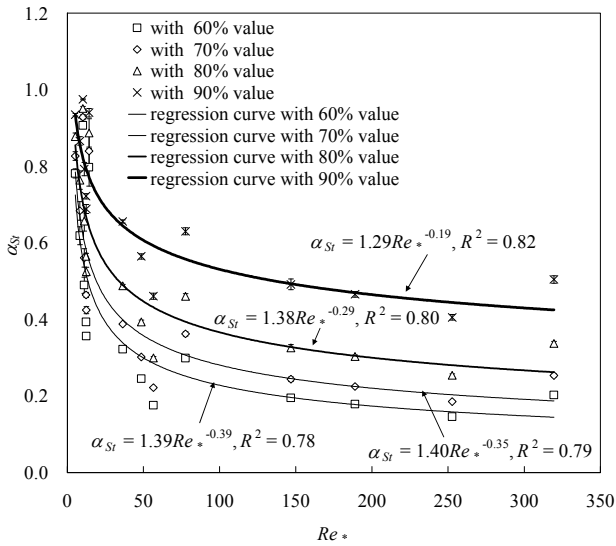


図-H.2  $0.6 \leq C_O'(z=0)/C_O(z=0) \leq 0.9$

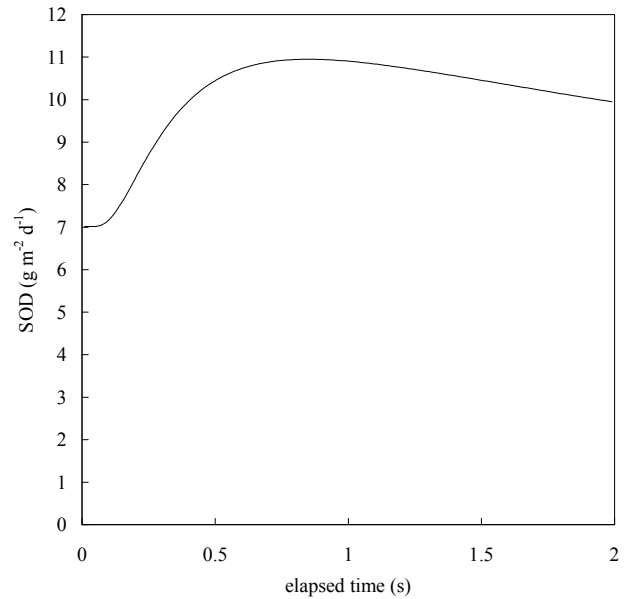


図-I.1 粗度無し，平均流速3.7 cm s<sup>-1</sup>の場合

#### 付録 H 粗さのレイノルズ数と $\alpha_{St}$ との関係

本文中には記載しなかった水・堆積物界面における DO濃度の過小評価率  $C_O'(z=0)/C_O(z=0)$  をパラメータとした，粗さのレイノルズ数と  $\alpha_{St}$  との関係を図-H.1～H.3に示す。図中には指数関数による回帰式も記載している。

#### 付録 I vortex shedding 発生直後の SOD の変動

中村ら(2005)による実験条件に対して，本文中に記載していない vortex shedding 発生直後の SOD の変動に関する計算結果について図-I.1～I.17に示す。

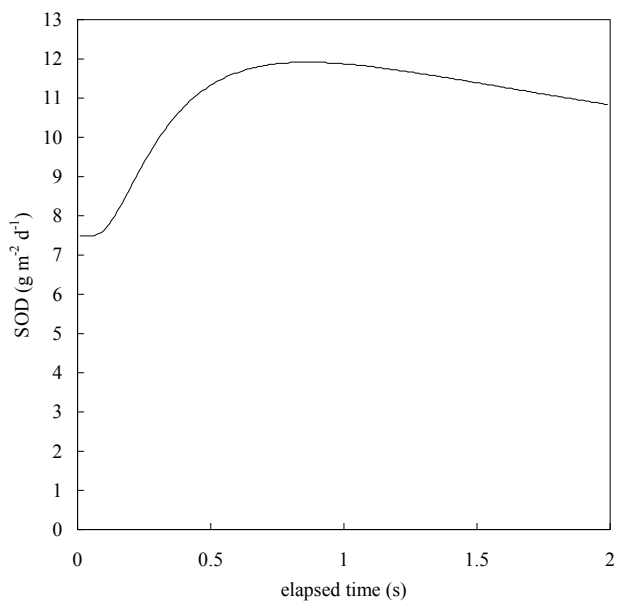


図-1.2 粗度無し, 平均流速5.6 cm s<sup>-1</sup>の場合

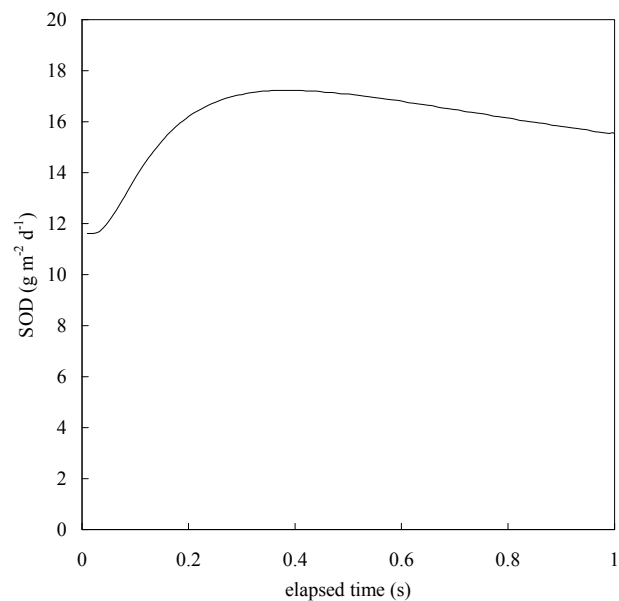


図-1.4 粗度無し, 平均流速9.0 cm s<sup>-1</sup>の場合

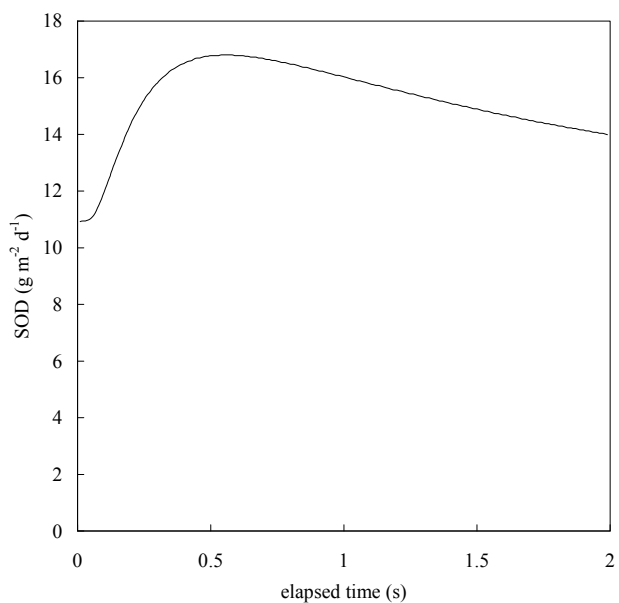


図-1.3 粗度無し, 平均流速7.0 cm s<sup>-1</sup>の場合

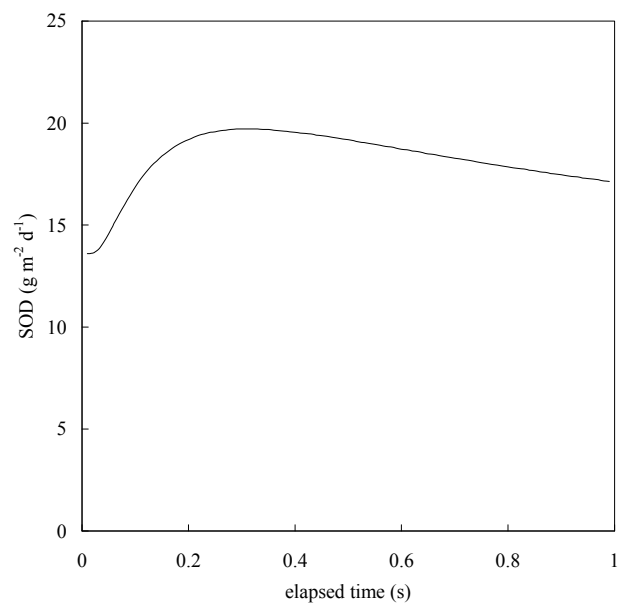


図-1.5 粗度無し, 平均流速10.4 cm s<sup>-1</sup>の場合

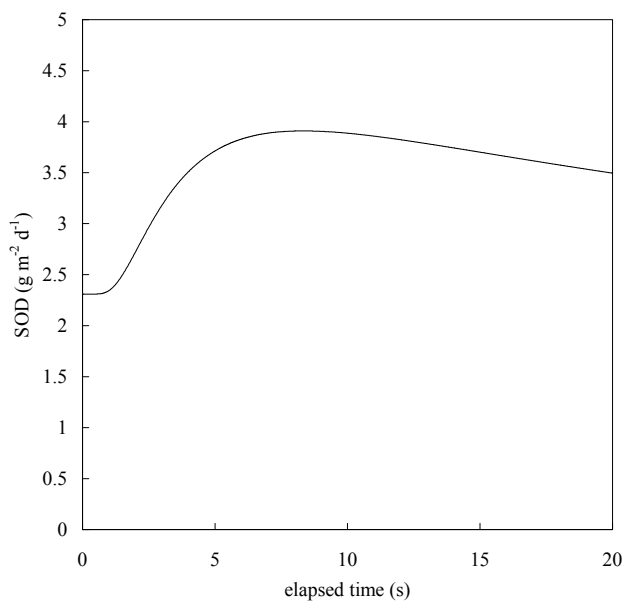


図-1.6 3 mm粗度使用, 平均流速 $1.2 \text{ cm s}^{-1}$ の場合

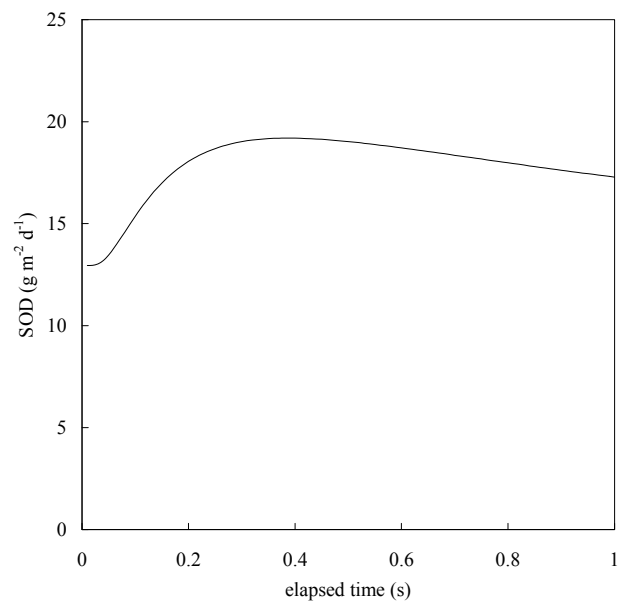


図-1.8 3 mm粗度使用, 平均流速 $5.0 \text{ cm s}^{-1}$ の場合

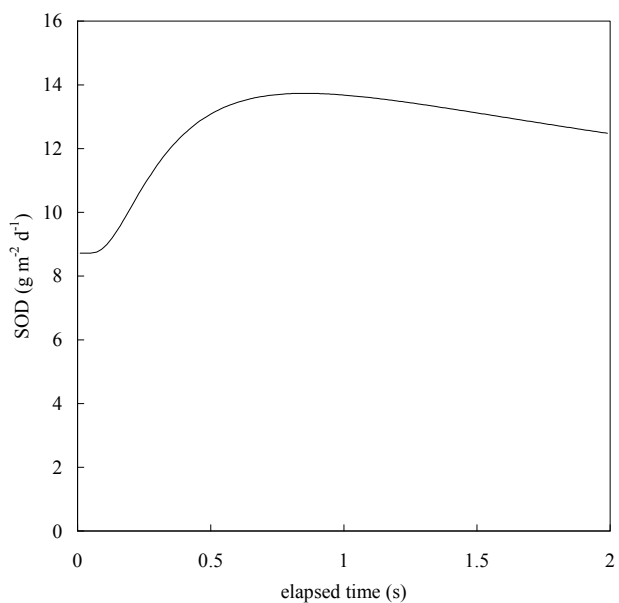


図-1.7 3 mm粗度使用, 平均流速 $3.1 \text{ cm s}^{-1}$ の場合

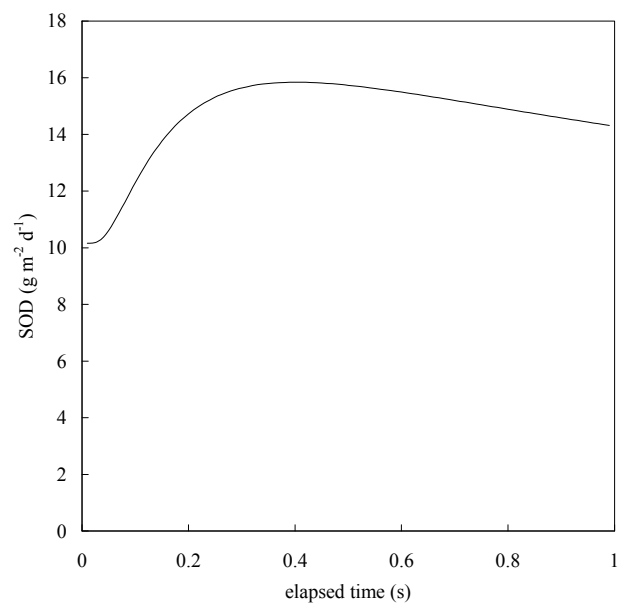


図-1.9 3 mm粗度使用, 平均流速 $6.2 \text{ cm s}^{-1}$ の場合



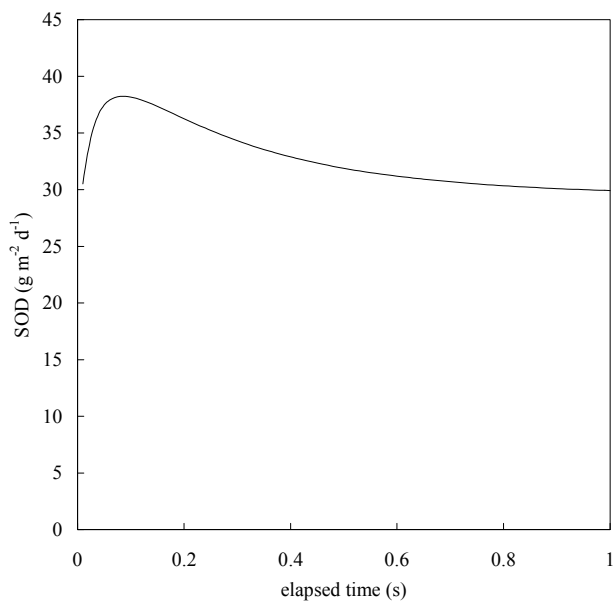


図-I.10 3 mm粗度使用, 平均流速9.3 cm s<sup>-1</sup>の場合

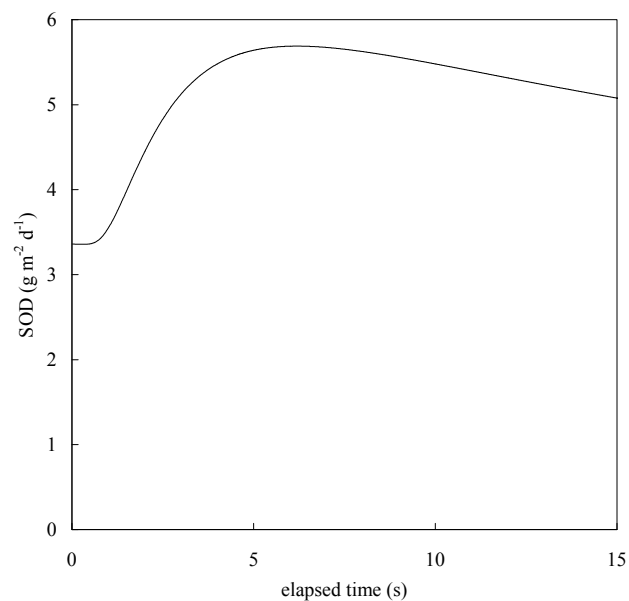


図-I.12 5 mm粗度使用, 平均流速1.2 cm s<sup>-1</sup>の場合

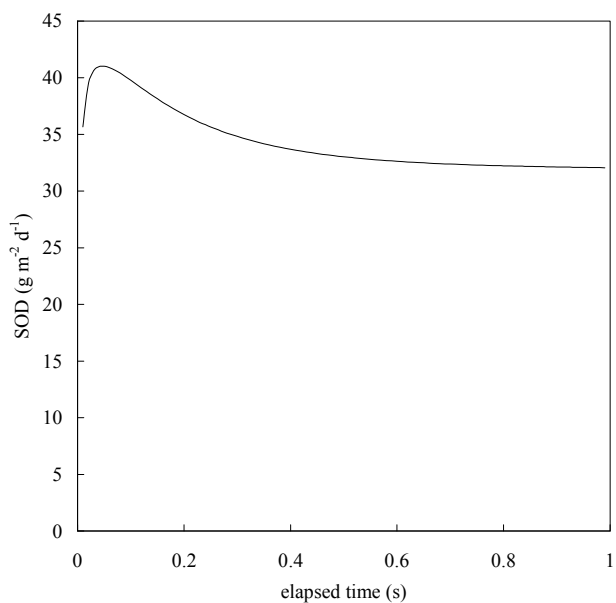


図-I.11 3 mm粗度使用, 平均流速9.4 cm s<sup>-1</sup>の場合

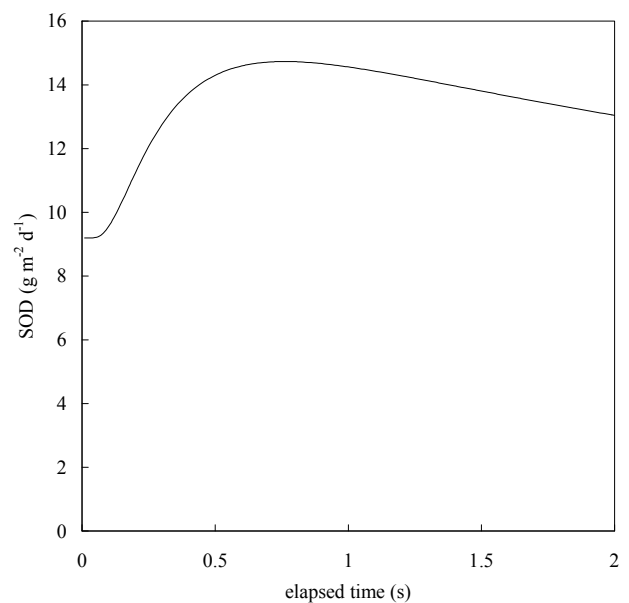


図-I.13 5 mm粗度使用, 平均流速3.5 cm s<sup>-1</sup>の場合

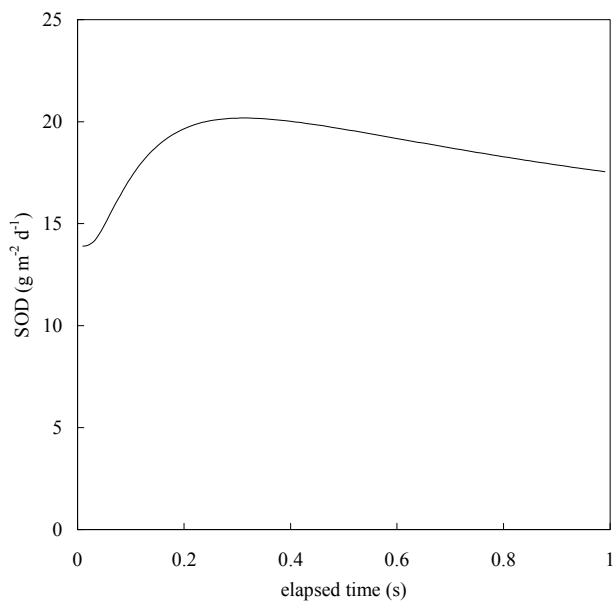


図-I.14 5 mm粗度使用, 平均流速4.8 cm s<sup>-1</sup>の場合

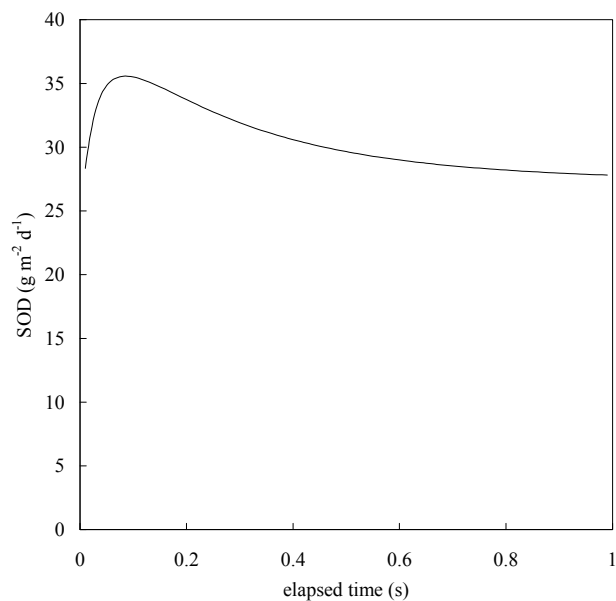


図-I.16 5 mm粗度使用, 平均流速7.6 cm s<sup>-1</sup>の場合

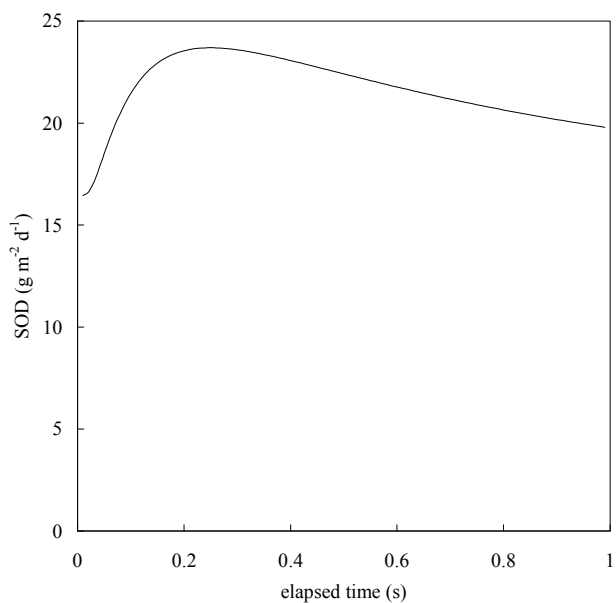


図-I.15 5 mm粗度使用, 平均流速7.1 cm s<sup>-1</sup>の場合

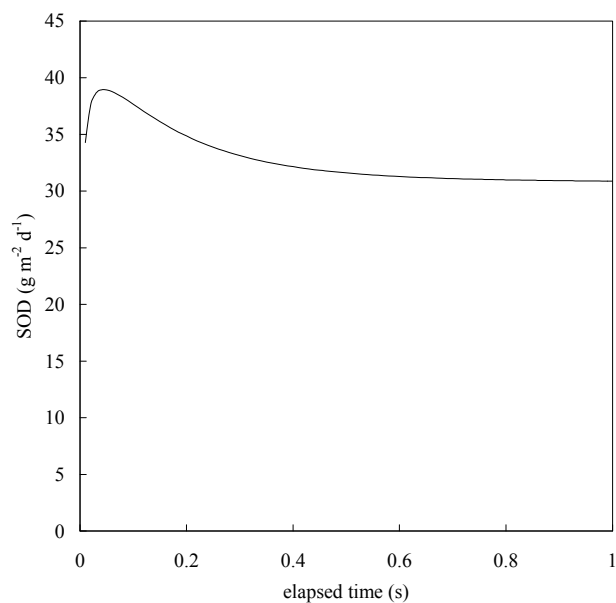


図-I.17 5 mm粗度使用, 平均流速11.3 cm s<sup>-1</sup>の場合

## 付録 J 用語解説

### ・バルク領域

流速や溶存物質濃度において、界面付近の変化が著しい領域を除く、水塊の主要部分を指す。

### ・境界層

界面付近において、平均的な流速場に対してより小さな流速を持つ、流速勾配が顕著である領域。平均流速の99%以下の流速値を持つ領域を境界層と定義することが多い（図-J.1参照）。

### ・粘性底層

壁面の近傍における、流れがほぼ層流状態を保つ領域（図-J.1参照）。

### ・拡散境界層

界面付近において、平均的な濃度場に対してより小さな濃度を持つ、濃度勾配が顕著である領域（図-J.2参照）。

### ・DO浸透層

堆積物表層における、DOが存在する層。

### ・酸化層

堆積物表層における、酸化還元電位（試料中の酸化還元状態の程度を示す指標で、酸化性物質と還元性物質との平衡によって生じる基準となる電位の差）が正の領域。

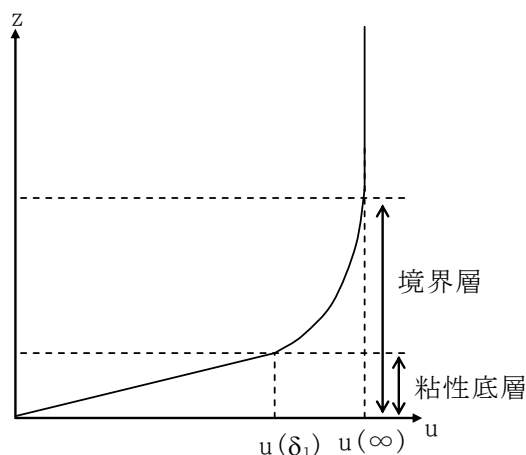


図-J.1 境界層および粘性底層の模式図

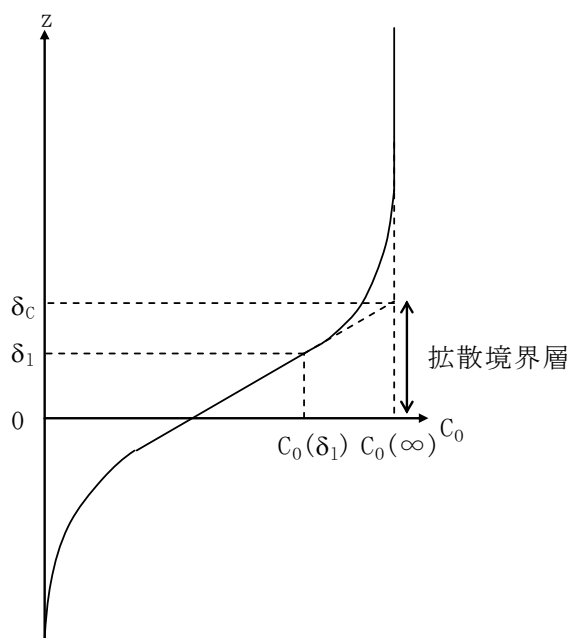


図-J.2 拡散境界層の模式図

## 付録 K 記号表

$A$  ; semi-stagnant filmを除く拡散境界層内における溶存物質の拡散抵抗

$C(z)$  ; 溶質濃度

$c_l$  ; semi-stagnant film内の水塊の更新周期に関連する定数

$C_f$  ; 底面抵抗係数

$C_0(z=0)$  ; 水・堆積物海面におけるDO濃度

$C_0(z=\infty)$  ; バルク領域におけるDO濃度

$Da$  ; ダムケラー数

$dl$  ; 深さ方向に $dz$ 移動する際の実際の経路の長さ

$D_s$  ; 堆積物中での見かけの拡散係数

$D_{zm}$  ; 鉛直方向の分子拡散係数

$D_{zmax}$  ; 境界層内における乱流拡散係数の最大値

$D_{zt}(z)$  ; 乱流拡散係数

$f$  ; Formation Factor

$F$  ; スタントン数の増幅係数

$J$  ; 拡散による溶存物質の輸送速度

$k$  ; 一次オーダーの化学反応速度定数

$K$  ; 定数

$K_0$  ; 生物の呼吸に関する半飽和定数

$k_s$  ; 相当砂粒粗度

$r$  ; 水中におけるDO消費に関する反応速度係数

$R$  ; 単位体積当たりの堆積物によるDO消費

	速度
$Re^*$	; 粗さのレイノルズ数
$s$	; semi-stagnant film内の水塊の更新周期
$Sc$	; シュミット数
$Sc_t$	; 乱流シュミット数
$SOD$	; 水・堆積物界面におけるDOの拡散フラックス
$St$	; スタントン数
$t$	; 時間
$u^*$	; 摩擦速度
$\bar{u}$	; バルク領域における水平方向の平均流速
$z$	; 鉛直方向の位置 (水・堆積物界面を0, 上向きを正とする)
$\alpha_{St}$	; 過小評価された水・堆積物界面におけるDO濃度を用いて計算されたスタントン数と本モデルにより得られるスタントン数との比
$\beta$	; vortex sheddingにより拡散境界層内の水塊が交換される割合
$\delta$	; 境界層厚さ
$\delta_d$	; 拡散境界層厚さ
$\delta_s$	; 堆積物表層の酸化層厚さ
$\Delta C$	; semi-stagnant film内の溶質濃度とバルク領域の溶質濃度との差
$\kappa$	; カルマン定数
$\mu$	; 生物による最大呼吸速度
$\nu$	; 動粘性係数
$\nu_t(z)$	; 渦動粘性係数
$\theta$	; tortuosity
$\tau_{d1}$	; $z > \beta\delta_d$ における水塊の更新に伴う拡散の時間スケール
$\tau_{d2}$	; $0 < z < \beta\delta_d$ における水塊の更新に伴う拡散の時間スケール
$\omega$	; vortex sheddingの平均各周波数
$\phi$	; 間隙率
$r$	; 水中におけるDO消費に関する反応速度係数

港湾空港技術研究所資料 No.1194

2009・3

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬 3 丁目 1 番 1 号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright©(2009)by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。