

# 底泥による酸素消費に関する研究

細井由彦\*・村上仁士\*\*・上月康則\*\*\*

流速の変動する感潮部において堆積した底泥による酸素消費を、定量的かつ一般的に評価する方法について検討した。浮遊させた底泥による酸素消費特性について検討した後、その結果を用いて、河床に堆積した底泥による酸素消費を、浮遊時の酸素消費特性、堆積状態、底泥上の流水の特性により評価する方法を、実験とモデルにより考察した。

**Keywords :** sediment oxygen demand, bottom sediment, oxygen transfer model

## 1. 緒 言

河床に蓄積した有機性の汚泥による溶存酸素の消費は、水質汚濁の分野の重要なテーマとして古くから研究が行われてきた。その成果は杉木によりよく整理されている<sup>1)</sup>。しかしそれらの多くは、個々の現地における底泥による酸素消費量を求めたものであり、その機構はともかく、定量的な一般性を有しているとは言い難い。河床堆積底泥はその特性が複雑であり、必ずしも一般的に表示することはできないと考えられるが、水質汚濁解析を行うに当たり、その酸素消費特性を示す何等かの指標は必要であると考えられる。

とくに底泥がよく堆積していると考えられる河川感潮部においては、潮汐にともなう流速の変動がある。この流速の変動も、底泥の浮上、沈降を通してのみではなく、堆積泥による酸素の消費にもなんらかの影響を及ぼすことが考えられる。従来より、堆積させた底泥上の水を攪はんすることにより、底泥による酸素消費が促進されるという実験結果が報告されている<sup>2),3)</sup>。最近では茂庭<sup>4)</sup>が日本橋川で採取した底泥を用いて検討を行っており、底泥上の水に乱れが存在すると酸素の消費が、静水時の $0.2\sim 0.4\text{ g-O}_2/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 程度が、 $0.8\sim 1.2\text{ g-O}_2/\text{m}^2\cdot\text{day}$ となると報告している。しかしこれはあくまで日本橋川の底泥によるものであり、この結果をどのように他の河川に適用していくかについては示されていない。さらに乱れについても定性的に扱われているだけであり、具体的にどのような流れがどの程度の影響を及ぼすかについては言及されていない。

本研究では底泥粒子による酸素消費特性を実験により

\*正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科

(〒680 鳥取市湖山町南4丁目)

\*\*正会員 工博 徳島大学工業短期大学部教授 土木工学科

\*\*\*学生会員 工修 徳島大学大学院博士課程

調べ、各底泥指標との関係を検討した。つぎに実験水路を用いて底泥を設置し、堆積状態の底泥による酸素消費特性について検討した。さらに一般的な適応ができるように、底泥の特性と水理指標を用いて、流れの中における堆積泥による酸素消費量を定量的に予測するモデルを開発し、実験による検証を行った。

## 2. 底泥粒子による酸素消費

### (1) 実験方法

実験に用いた底泥は徳島市内を流れる新町川より採取した。当河川は徳島市内を網目状に流れて紀伊水道に注ぐ感潮河川である。流域の一部を除いて下水道は未整備であり、生活排水、工場排水等が流入している。流域より流入してくるBOD負荷量の約7割を生活系の排水がしめており、その量は1日あたり約2.7トンと見積もられている。市の中心部において、環境基準は以前は河川E類型に指定されていたが、現在はC類型の当てはめが行われている。

採取した底泥を、2mmのふるいででき、貝殻等を除いたものを用いた。これをフラン瓶に曝気した蒸留水と共にいれ、密閉してマグネチックスターラーで攪はんし、泥を浮遊状態に保ちながら、数時間おきに溶存酸素計を用いて酸素濃度の変化を約3日間にわたり測定した。水中の酸素濃度が低下してくると、酸素の消費が抑制される。これを防ぐために、酸素濃度が低下すると、遠心分離器でいったん泥を除いた後、水を曝気されたものと交換して再び泥を戻して実験を継続した。底泥の酸素消費特性を表す標準的な指標として用いることを意図して、底泥を浮遊させる水には蒸留水を用い、かつ実験中はフラン瓶を20°Cの暗所においた。

### (2) 実験結果および考察

#### a) 酸素消費曲線

酸素濃度の測定結果の一例を図-1に示す。上述のよ

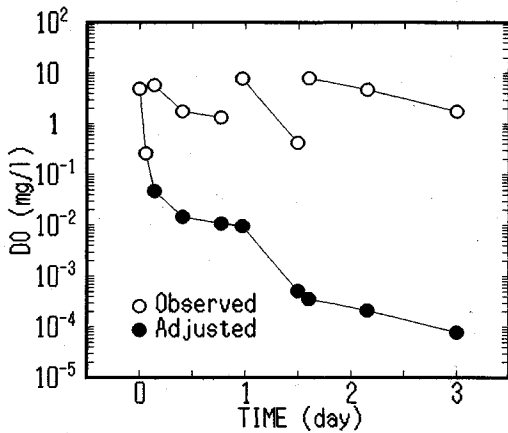


図-1 溶存酸素濃度の変化の一例

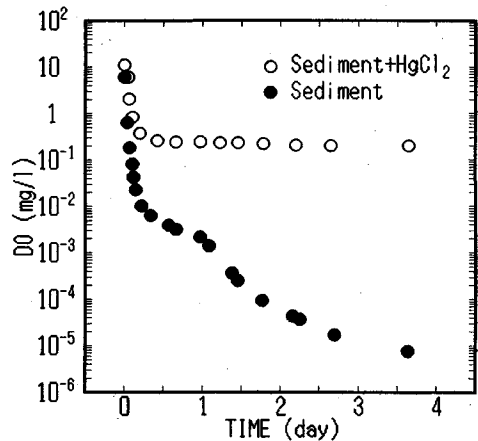


図-2 酸素消費曲線の一例

うに酸素の消費が進むと、曝気された水と入れ換えを行ったので、途中で酸素濃度が不連続になっている。このままでは解析が複雑になるので、図中に示すような修正を行った。すなわち酸素の消費を一次反応と考え、新しい水に交換したときの濃度を、その直前の曲線より外挿して求め、そこに新たな酸素消費曲線を平行移動した。一次反応による濃度変化は、変化量の絶対値ではなく反応速度定数、すなわち片対数グラフ上における傾きにより規定されるので、このような修正が可能になる。同じ泥についてこの方法で何度か消費曲線を描いてみたところ、ほぼ同様の曲線形を得ることができたので、この方法を採用することにした。

図-2は以上のようにして得られた酸素消費曲線の一例である。酸素消費曲線は、この図にみられるように、最初の数時間の急激な減少と、以後徐々に進む緩やかな減少の2段階を示した。図には、生物的な消費を抑制させるために、 $HgCl_2$ を0.05%加えた場合の結果も同時に示されている。2つの曲線を比較すると、生物以外の要因による酸素消費は浮遊攪はん開始後の約3時間で終了するのに対し、生物による消費は実験を継続した3日の間続いていた。

b) 酸素消費速度定数

酸素消費特性を表す指標として酸素消費速度定数を次式により定義する。

$$V \frac{dC}{dt} = -kCW_m \dots \dots \dots (1)$$

ここでCは溶存酸素濃度、Vはフラン瓶中の水の体積、 $W_m$ は泥の乾燥重量である。したがってkは浮遊泥濃度当りの酸素消費速度定数である。式(1)より次式を得る。

$$k = -\frac{1}{t} \ln(C/C_0) \frac{1}{W_m/V} \dots \dots \dots (2)$$

各実験により得られた濃度曲線より、図-2に見られる

ような最初の約3時間の間に進む急速な酸素の消費を第1段階の消費、以後徐々に進む緩やかな消費を第2段階の消費とし、それぞれについて式(2)にカーブフィッティングして、第1段階の酸素消費速度定数 $k_1$ 、第2段階の酸素消費速度定数 $k_2$ を求めた。 $k_1$ 、 $k_2$ はSS濃度あたりの酸素消費速度定数で、 $[\text{時間}]^{-1} \cdot [\text{濃度}]^{-1}$ の次元をもっており、ここでは $1/(\text{hr SS kg}/\text{m}^3)$ で表す。

上記の実験に用いた底泥については、採泥時にその特性を見るために、強熱減率、間隙水中の第一鉄イオン濃度、酸化還元電位を測定した。その結果と $k_1$ 、 $k_2$ との関係を図-3に示す。 $k_1$ 、 $k_2$ の間でとくに際だった特徴というものはみられず、いずれも酸化還元電位との間の負の相関はそれほど明瞭ではないが、強熱減率、第一鉄イオン濃度との間に正の相関が認められる。徳島市内河川より得た底泥においては、 $k_1$ が大きいものは $k_2$ も大きく、両者には強い相関があることが示唆される。このように底泥粒子を浮遊させたときの酸素消費を評価する大まかな指標として、強熱減率や第一鉄イオン濃度を用いることもできる。

$k_1$ 、 $k_2$ では値は異なるが、ここに見たように傾向としてはほぼ同じである(両者には相関関係がある)と考えられる。そこで以後に用いる底泥粒子自体の酸素消費特性を示す指標として、測定時間が短くてよい $k_1$ を酸素消費速度定数として用いることとし、以後kで表す。ただし $k_1$ と $k_2$ でまったく異なった傾向を示すような底泥の場合には、酸素消費特性を代表するものについてさらに検討する必要も生じるであろう。

c) 温度の影響

同じ泥であっても水温が異なると酸素の消費も異なると考えられる。そこで3種類の泥を用いて、水温を変化させて実験を行ってみた。反応速度定数の温度依存性には、アレニウスの式がよく用いられる。そこで実験結果より $1/T$ とkを片対数グラフで整理するアレニウス

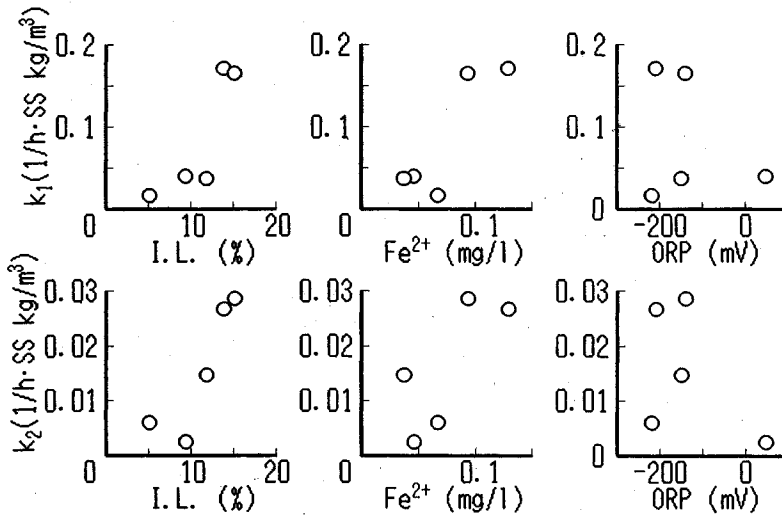


図-3  $k_1, k_2$  と各種底泥指標との関係

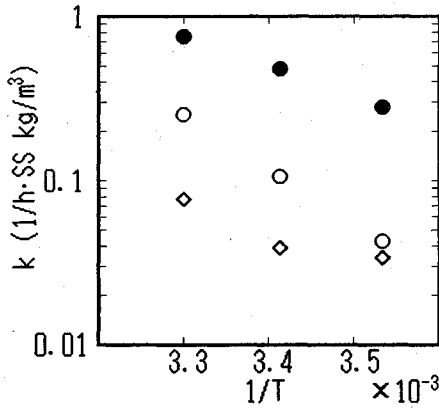


図-4 酸素消費速度定数と温度との関係

ロットを行ってみると、図-4 のようになった。実験を行ったのは 10~30°C の水温の範囲であるが、この範囲では水温が上昇すると酸素の消費が活発になることがわかる。さらにその温度依存性は、アレニウスの式でまとめうるものと考えられる。

図-4 に見られる  $\ln k$  に対する  $1/T$  の係数の値は、 $k$  の値の大きな実験ケースの順に、それぞれ -4228, -7648, -3447 である。温度依存性を示す目安として、とりあえずこれらの数値の平均値 -5118 を用いて、20°C 付近の温度  $\theta$ °C のときの  $k$  の値  $k_\theta$  を 20°C における値  $k_{20}$  に換算する式を求めると次のようになる。

$$k_{20} = k_\theta \exp \left\{ \frac{-5118(\theta - 20)}{293(\theta + 273)} \right\}$$

$$\cong k_\theta \exp \{-0.060(\theta - 20)\} \dots \dots \dots (3)$$

後の水槽実験で得られた底泥の酸素消費については便宜上この式によって 20°C の値に換算するものとする。

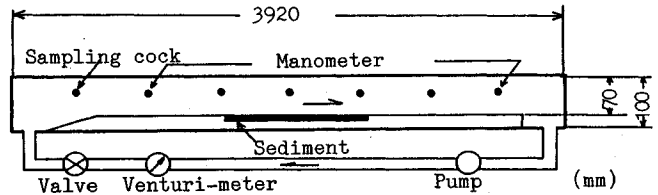


図-5 実験水路

### 3. 堆積底泥による酸素消費

#### (1) 実験および解析方法

##### a) 実験装置

河床に堆積した底泥による酸素の消費について検討する。実験には図-5 に示すような、長さ 3920 mm、幅 250 mm、深さ 100 mm の透明強化プラスチック製の矩形循環式管路を使用した。本水路は上ぶたが取り外し可能になっており、水路側面には採水用のコックが取り付けられている。

徳島市内河川より採取した底泥を、水路中央部に厚さ 1 cm、流れ方向に 1 m にわたって敷き、泥表面が乱れないように水道水を注水し、満水後空気が入らないようにして上ぶたを取り付けた。先の  $k$  の測定には蒸留水を用いたが、水槽実験では大量の水を必要とするために水道水を用いた。

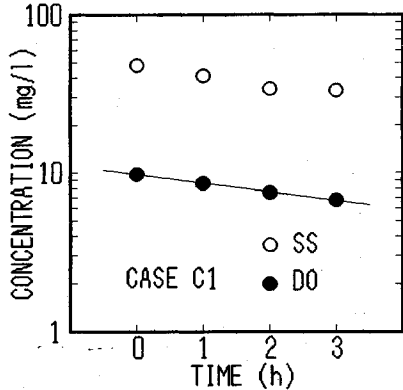
循環用パイプに取り付けられたバルブの開度を変化させることにより流速を変化させた。同一の泥を用いた実験を CASE A, B, C, … のように名付けて、流速を変化させて数回の実験を行った。敷き詰めている泥の酸素消費特性が変化する恐れもあるので、短時間で実験を終らせる必要があり、その妥当性は必ずしも明らかではないが、ここでは 1 回の実験時間は原則として 3 時間と

表一 実験に用いた底泥の  $k$

CASE	$k$ (1/hr SS kg/m <sup>3</sup> )
A	0.181
B	0.137
C	0.795
D	0.756
E	0.337
F	0.085

表二 各実験の水力条件

CASE	平均流速 (cm/s)	摩擦速度 (cm/s)
A1	4.2	0.96
A2	9.5	1.10
A3	22.4	1.38
A4	24.2	1.42
B1	4.2	0.96
B2	21.2	1.36
B3	23.0	1.40
C1	21.8	1.37
C2	24.2	1.42
C3	24.5	1.42
D1	14.8	1.22
D2	23.6	1.41
D3	24.5	1.42
E1	14.8	1.21
E2	22.4	1.38
F1	14.8	1.22
F2	22.4	1.38
F3	24.5	1.42



図一六 SSおよびDOの測定結果とDO変化曲線の当てはめの一例

した。

1時間おきに採水して水の酸素濃度, SS, 水温を測定した。また敷き詰めた泥の含水率, 比重, 粒度分布(土質試験法に準ずる方法でふるいと比重浮ひょうを用いて測定)とともに, 第2章で定義した酸素消費速度定数  $k$  を測定した。実験に用いた底泥の  $k$  の測定結果を表一に示す。

b) 酸素消費特性の解析

泥による酸素消費を一次反応で表されると考えると, 循環水中の酸素濃度について次式がなりたつ。

$$V \frac{dC}{dt} = -KAC - kVSC \dots \dots \dots (4)$$

上式中  $V$  は水量で, ここでは水路を循環している水量を示す。 $C$  は酸素濃度,  $A$  は水と接している堆積底泥層の表面積,  $S$  は浮遊泥濃度,  $K$  は底泥層単位表面積当りの酸素移動係数である。式(4)の解は次のようになる。

$$C = C_0 \exp\{- (KA/V + kS)t\} \dots \dots \dots (5)$$

流速が小さい場合の実験では泥の巻き上がりも小さく, 式(4)の右辺第2項はほとんど影響を及ぼさないが, 流速が大きくなると巻き上がって浮遊する泥も増加し, 浮遊泥による酸素消費も考慮する必要が生じる。 $k$  の値は各実験に用いた泥について2章に述べた方法で求めた。

式(5)に  $A, V$  およびあらかじめ求めておいた  $k,$

さらに実験中1時間おきに求めた浮遊物濃度の平均値を  $S$  として与え, 循環水の酸素濃度の変化曲線にフィットさせることにより  $K$  を求めた。その例を図一六に示す。すべての実験において実験中の水温は 18.0°C~21.9°C の範囲にあった。得られた値を式(3)を用いて 20°C における値に換算した。

c) 流れの測定

流量の測定をベンチュリーメータで行った。

またマノメータを用いて損失水頭を求め, 摩擦速度を計算した。底泥を敷き詰めない状態で水を循環させてマノメーターにより2点間の損失水頭を求め, 当循環水槽壁面の摩擦損失と流速との関係をあらかじめ求めておいた。底泥敷設時の損失水頭と流速より, 先に求めた関係を用いて, 底泥以外の水槽壁面に作用する摩擦力を求め, これを差し引いて底泥面の摩擦速度を求めた。

a) で述べたように1回の実験は3時間とし, 一度泥を敷くと順次流速を増加させて数回の実験を行った。各実験の水力条件を表二に示す。実験CASEの最初のアルファベットが同じ場合には, 同じ敷設泥による実験を示している。

(2) 実験結果

a) 浮遊泥および堆積泥による酸素消費

実験結果より式(5)の指数部の第1項すなわち堆積泥による酸素消費を表す項と, 第2項すなわち浮遊泥による酸素消費を表す項の大きさの比較を行ってみた。その結果を図一七に示す。SSが150 mg/lを越えた場合を除いて, すべての実験において堆積泥による酸素消費が

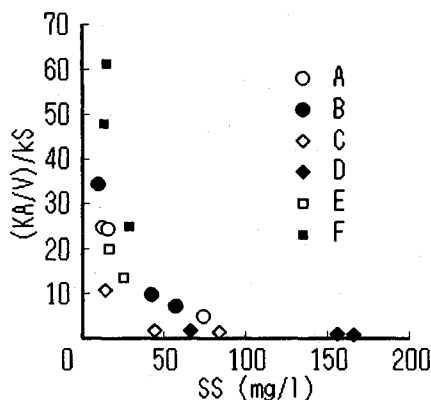


図-7 堆積泥と浮遊泥による酸素消費の比較

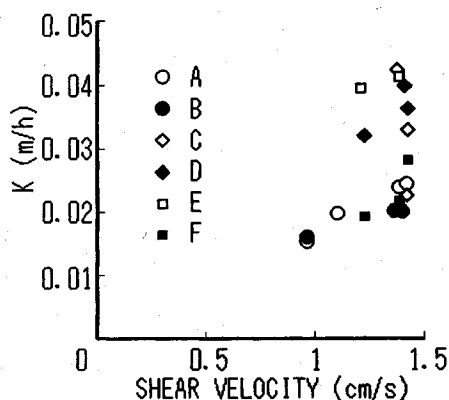


図-8 堆積泥による酸素消費

浮遊泥によるものを上回っていた。とくに通常の河川における高いSSの濃度と考えられる50 mg/l程度では堆積泥による消費が浮遊泥の10倍近くあると考えられる。これは従来の報告に比べて<sup>5),6)</sup>、堆積泥による消費の比率がかなり高い結果となっている。ただしここでは浮遊泥による酸素消費を、先のフラン瓶を用いた実験より得たkを用いて計算している。流れによる堆積状態からの巻き上がりは必ずしも均一には起こらず、粒径の小さいものが卓越する可能性もあり精度には若干問題も残っている。

b) 堆積泥による酸素消費

堆積泥による酸素消費と摩擦速度との関係を示したものが図-8である。同じ泥による各実験ごとに見ていくと、摩擦速度が大きくなると酸素移動係数が大きくなる。Case-Cを除き全体的な傾向としていうことができそうである。摩擦速度が大きくなるほど、底泥層表面付近の水の交換が促進され、酸素消費も多くなるものと考えられる。これは従来の報告にあるように、乱れの存在により酸素消費が増加するという結果とも共通するものである。摩擦速度は底泥-水境界面付近の乱れに関係する量と考えられるので、堆積泥の酸素消費と乱れの

表-3 logKの重回帰分析結果

重相関係数	0.8190
寄与率	0.6708
自由度調整済み寄与率	0.5695
F値	6.62

変数	回帰係数	標準回帰係数	偏相関係数
log k	0.1695	0.4409	0.3600
log w	0.7260	0.3124	0.2447
log d	-0.1756	-0.3101	-0.3802
log u*	0.9757	0.3813	0.4922
const	-1.5767		

関係を検討する上で適当であると考えられる。

図-8の結果を、底泥の特性も含めて検討する目的で、摩擦速度の他に、k, 含水率, 中央粒径を従属変数として、Kに関する重回帰分析を行ってみた。その結果は次のようになった。

$$K = 0.0265k^{0.169}w^{0.726}d^{-0.176}u_*^{0.976} \dots \dots \dots (5)$$

ここでKの単位はm/hr, kは1/(hr SS kg/m<sup>3</sup>)である。u\*は摩擦速度 [cm/s], wは重量含水率 [-], dは中央粒径 [mm]である。重回帰分析の結果を表-3に示す。

これによると、堆積している泥粒子自身の酸素要求が大きいほどKが大きくなり、また泥の粒径が小さいほどKは大きくなるといえる。しかし酸素消費のメカニズムにまで立ち入った説明は行えないので、つぎにモデルによる検討を行ってみる。

4. 堆積底泥による酸素消費予測モデル

以上のように底泥による酸素の消費は、底泥粒子自身も持っている特性と、水の流れとの両方の影響を受ける。これらの影響を考慮した、堆積底泥による酸素消費を予測するためのモデルについて検討する。

(1) 浮遊底泥粒子による酸素消費の扱い

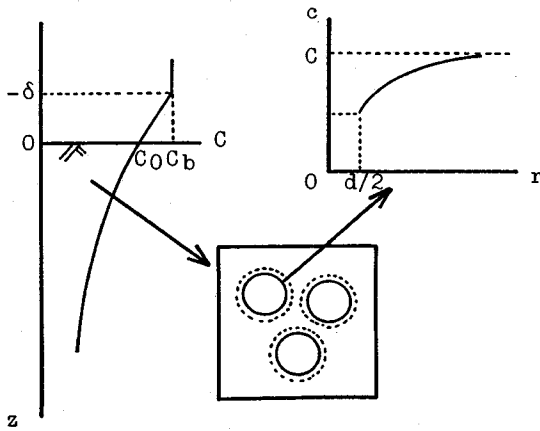
底泥による酸素消費はすでにみてきたように、生物学的要因や化学的要因があり、一概に表現することはできない。ここでは底泥粒子は球形であるとし、その表面から酸素がその濃度に比例する速度で吸収されるとしてモデル化する。底泥の単位表面積当りの酸素の吸収速度をK'csとする。直径dの粒子による酸素吸収速度は

$$\pi d^2 k' c_s \dots \dots \dots (6)$$

となる。ここでcsは底泥粒子表面における酸素濃度である。底泥粒子の密度をρsとすると、単位重量当りの吸収速度は

$$\pi d^2 k' c_s / (\pi d^3 \rho_s g / 6) = 6k' c_s / d \rho_s g \dots \dots \dots (7)$$

となる。底泥の粒度分布をf(d)とすると、d~d+dd



図—9 モデルの概観と座標系

の粒子による酸素吸収量は

$$(6k'cs/d\rho sg)f(d)dd$$

だから総吸収量は単位底泥重量当り

$$(6k'cs/\rho sg) \int (f(d)/d)dd$$

と表される。

さきに示したフラン瓶による浮遊泥の酸素消費に関する実験では、浮遊物の単位重量当りの酸素消費速度を酸素消費速度定数  $k$  と、水中の酸素濃度  $c$  との積で表した。ここにおけるモデルからみた  $k$  の位置づけは次のようになる。

$$(6k'c/\rho sg) \int (f(d)/d)dd = kc \dots (8)$$

底泥粒子表面において酸素の吸収がある場合、表面付近には濃度に関する境界層ができ、 $c_s$  は厳密には水中の濃度  $c$  より小さくなる。したがって  $c_s$  が  $c$  に等しいとにおける球面は直径  $d$  よりもわずかに大きくなると考えられる。しかし浮遊状態においては、強攪はんされており境界層は非常に薄いと考えられ、底泥粒子表面における濃度と水中濃度が等しいと考えられるものとしている。

(2) 底泥層内における酸素分布

(1) で検討した底泥粒子表面における酸素吸収速度を底泥層内の酸素濃度に結び付けるモデルについて、図—9 に示すように考える。底泥層内間隙水中の酸素が、個々の底泥粒子表面より上記のように吸収され、しかも (1) の場合とは異なり、粒子周辺の水の交換がないため、底泥粒子表面のごく近傍に酸素濃度  $c$  の分布が生じ、これがさらに底泥層間隙水本体の酸素濃度  $C$  の深さ方向の分布を形成させるものとする。本モデルでは底泥粒子は近接している場合にもわずかに離れており、粒子表面付近に形成される酸素分布には影響しあわないものとする。

a) 泥粒子周辺の酸素濃度

図—9 中に示すように球形粒子の中心に原点をとった球座標を考える。間隙水は静止しているとし分子拡散のみを考える。底泥粒子の周辺で定常な濃度分布が形成されているとすると、酸素濃度に関する式は次のように与えられる。

$$\frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dc}{dr} \right) = 0 \dots (9)$$

境界条件としてまず  $r = \infty$  において、 $c$  は間隙水の酸素濃度  $C$  に等しいとする。さらに粒子表面における吸収速度は式 (6) に等しい。したがって次のようになる。

$$r = \infty : c = C \dots (10)$$

$$r = d/2 : \int_s -D \frac{dc}{dr} dS = \pi d^2 ck' \dots (11)$$

ここで  $D$  は溶存酸素の分子拡散係数、積分領域  $S$  は粒子表面を表す。以上の境界条件のもとに式 (9) を解いて、粒子周辺の濃度分布として次式を得る。

$$c = C \left( 1 + \frac{d^2 k'}{4D - 2dk'} \frac{1}{r} \right) \dots (12)$$

したがってこの粒子により吸収される酸素は式 (6)、(12) より次のようになる。

$$\begin{aligned} [\pi d^2 k' c]_{r=d/2} &= \pi d^2 k' C \left[ 1 + \frac{d^2 k'}{4D - 2dk'} \frac{1}{r} \right]_{r=d/2} \\ &= \frac{2\pi d^2 DK'}{2D - dk'} C \dots (13) \end{aligned}$$

b) 間隙水中の酸素濃度分布

図—9 に示すように泥層表面を原点にとり、底泥層の深さ方向に下向きに  $z$  軸をとる。泥層内に厚さ  $\Delta z$  のコントロールボリュームを考える。体積含水率を  $\theta$  とすると、コントロールボリューム内の泥の重量は

$$\Delta z(1-\theta)\rho sg$$

となる。したがって粒径が  $d \sim d+dd$  の粒子の重量は

$$\Delta z(1-\theta)\rho sgf(d)dd$$

であるから、粒子数は

$$\Delta z(1-\theta)\rho sgf(d)dd / (\pi d^3 \rho sg/6) \dots (14)$$

となる。よって式 (13)、(14) より粒径  $d$  の粒子による酸素の吸収量は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta z(1-\theta)\rho sgf(d)dd}{\pi d^3 \rho sg/6} \frac{2\pi d^2 DK'}{2D - dk'} C \\ = \frac{12DK' \Delta z(1-\theta)f(d)dd}{d(2D - dk')} C \dots (15) \end{aligned}$$

したがってコントロールボリュームの酸素収支は次のようになる。

$$\theta D \frac{d^2 C}{dz^2} = \int \frac{12DK'(1-\theta)}{d(2D - dk')} Cf(d)dd \dots (16)$$

これを書き直して次のようになる。

$$\frac{d^2 C}{dz^2} = \alpha C \dots (17)$$

$$\alpha = 12 \frac{(1-\theta)}{\theta} \int k' \frac{f(d)}{d(2D-dk')} dd \dots\dots\dots (18)$$

式 (17) の境界条件を次のように与える。

$$z=0 \text{ (泥層表面)} : C=C_0 \dots\dots\dots (19)$$

$$z=\infty \text{ (深層部)} : dC/dz=0 \dots\dots\dots (20)$$

この境界条件のもとに式 (17) を解くと次のようになる。

$$C=C_0 \exp(-\sqrt{\alpha}z) \dots\dots\dots (21)$$

c) 流水部の酸素濃度分布

つぎに、流れている水から底泥層への酸素の移動を考える。乱流場の固定境界面における物質移動には、濃度境界層モデルがよく用いられる。すなわち濃度境界層外では、乱流により物質はよく混合され、一様濃度になっており、固定境界面付近の境界層内では、乱れは抑制され分子拡散に支配されて物質が輸送されると考える。境界層内では酸素の消費はないとすると、酸素濃度に関する式は次のようになる。

$$D \frac{d^2 C_w}{dz^2} = 0 \dots\dots\dots (22)$$

ここで  $C_w$  は水相における酸素濃度であり、泥相の間隙水中の酸素濃度と区別している。b) において  $z$  軸は泥層表面（水泥境界面）を原点とし、鉛直下向きにとってあるので、ここにおいても同様の座標系を使用する（図-9 参照）。

濃度境界層の厚さを  $\delta$  とすると、境界層外縁では酸素濃度は水流本体の一樣濃度  $C_0$  に等しい。したがって境界条件は次のようになる。

$$z=-\delta : C_w=C_0 \dots\dots\dots (23)$$

もう一つの境界条件は泥層との接触面におけるもので、式 (19) と同様である。

$$z=0 : C_w=C_0 \dots\dots\dots (24)$$

式 (23), (24) のもとに式 (22) を解いて、境界層内濃度分布として次式を得る。

$$C_w = \frac{C_0 - C_b}{\delta} z + C_0 \dots\dots\dots (25)$$

境界面における酸素フラックスの連続より次式を得る。

$$z=0 : D \frac{dC_w}{dz} = \theta D \frac{dC}{dz} \dots\dots\dots (26)$$

式 (21), (25), (26) より、 $C_0$  は次のように表される。

$$C_0 = \frac{C_b}{1 + \theta\delta\sqrt{\alpha}} \dots\dots\dots (27)$$

したがって底泥層へ輸送される酸素フラックス  $N$  は次のようになる。

$$N = -\theta D \left[ \frac{dC}{dz} \right]_{z=0} = \sqrt{\alpha} C_0 \theta D$$

$$= \frac{\sqrt{\alpha} D \theta}{1 + \theta\delta\sqrt{\alpha}} C_0 \dots\dots\dots (28)$$

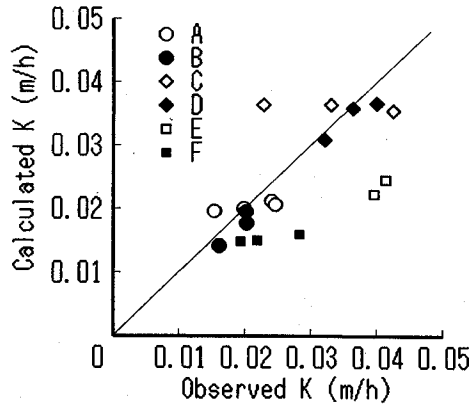


図-10 モデルによる  $K$  の予測結果

よって式 (28) より  $K$  はつぎのようになる。

$$K = \frac{\sqrt{\alpha} D \theta}{1 + \theta\delta\sqrt{\alpha}} \dots\dots\dots (29)$$

(3) 実験結果による検討

式 (18) で  $\alpha$  を求め、式 (29) に代入すると  $K$  を求めることができる。そこでこの式を実験結果に適用することを考える。式 (18) はやや複雑な形をしているので、簡単化することを考える。現実には粒径に分布が存在するが、単一の粒度構成であるとすると、式 (18) は次式となる。

$$\alpha = 12k' \frac{(1-\theta)}{\theta} \frac{1}{d(2D-dk')} \dots\dots\dots (30)$$

さらに式 (8) より  $k'$  として次式を得る。

$$k' = k \rho_s g d / 6 \dots\dots\dots (31)$$

式 (30), (31) より次式を得る。

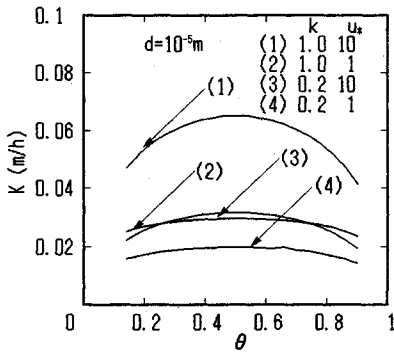
$$\alpha = \frac{(1-\theta)}{\theta} \frac{12k \rho_s g}{(12D - k \rho_s g d^2)} \dots\dots\dots (32)$$

泥層表面付近の分子拡散が卓越し、一様濃度勾配が形成される境界層の厚さ  $\delta$  は、Levich の 3 層モデル<sup>7)</sup> を用いて次のように与えられる<sup>8)</sup>。

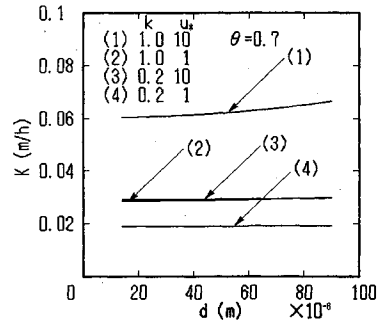
$$\delta = 13.4 D^{1/3} \nu^{2/3} / u_* \dots\dots\dots (33)$$

先の実験により求められた  $K$  と、それぞれの実験において求めた  $k, d, \theta, \rho_s, u_*$  および  $D = 2.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  を式 (32), (33), (29) に代入して求めた  $K$  との比較を行ったのが図-10 である。なおここでは  $d$  として重量基準による中央粒径を用いた。また  $\theta$  は重量含水率から求めた。

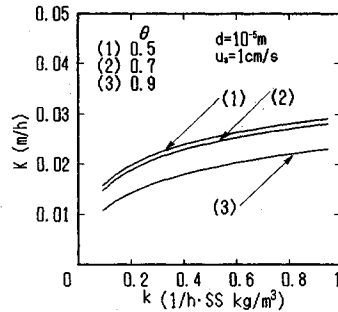
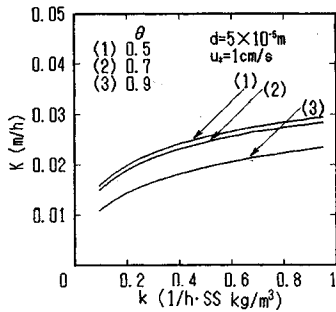
ここで導かれた予測式には、実験により決定する定数等が含まれていないにもかかわらず、大変よく実験結果と合っていることがわかる。したがって、堆積泥による酸素消費量を見積るには、ここに示した方法で  $k$  を求めるとともに、その他の泥の物性を示すパラメータの値を求めれば、計算することができる。なお 2 章で見たように、 $k$  は強熱減率等によっても、ある程度見積ること



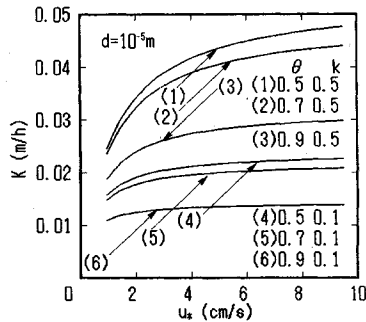
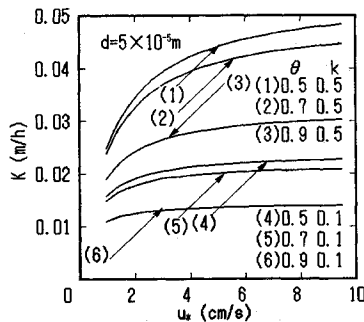
図—11 Kに及ぼす体積含水率の影響



図—14 Kに及ぼすdの影響



図—12 Kに及ぼすkの影響



図—13 Kに及ぼす摩擦速度の影響

が可能であると考えられる。

(4) 堆積底泥の酸素消費に及ぼす各因子の影響

実験結果の計算に用いられた  $d$  および  $\theta$  の範囲はそれぞれ  $0.048 \sim 0.253 \text{ mm}$ ,  $0.69 \sim 0.89$  であった。ここでは得られた式がこれをこえた範囲にも適用できるものとして、底泥の酸素消費に及ぼす各パラメータの影響について調べ、モデルの特性をみている。図—11は含水率の影響を示したものである。含水率が増加するにしたがって、底泥層内で酸素が拡散する通路が増加するため、 $K$ は大きくなるが、さらに増加すると、酸素を消費する底泥粒子が少なくなるため、 $K$ は減少する。

図—12は底泥粒子の酸素消費特性を示す  $k$  と、 $K$  との関係を示している。 $k$  の増加にともない、 $K$  は増加し

ている。図—13は摩擦速度と  $K$  との関係である。式(33)で示されるように、摩擦速度の増加により拡散層の厚さが薄くなり、 $K$  が大きくなる。摩擦速度が小さいうちは、その増加により  $K$  も顕著に増加しているが、大きくなるにつれ、摩擦速度の影響はそれほど目立たなくなる。これは摩擦速度の増加による拡散層の薄層化にも限界があるためである。現実問題としては、摩擦速度が増加するとともに、底泥の巻き上げが生じ、浮遊泥による酸素消費が増加するものと考えられる。

図—12, 13において、粒径の影響はそれほど顕著でないようであるが、このことは図—14を見ても明らかである。第3章で行った重回帰分析においては、粒径と  $K$  との間には負の関係があったが、モデルによる検討



表-4 粒径分布を考慮した例

平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	標準偏差 ( $\mu\text{m}$ )	k (1/h SS $\text{kg}/\text{m}^3$ )	単一粒径とした場合 のKに対する比
10	1	0.1	1.0000
10	3	0.1	1.0000
10	1	0.5	1.0000
10	3	0.5	0.9999
10	1	1	1.0000
10	3	1	0.9999
50	5	0.1	1.0000
50	20	0.1	0.9990
50	5	0.5	0.9998
50	20	0.5	0.9963
50	5	1	0.9997
50	20	1	0.9938

の結果、粒径はほとんど影響を及ぼさないものと考えられる。

#### (5) 底泥の粒径分布を考慮した場合

解析的に解いた表現を行うために底泥を単一の粒度構成として扱ったが、粒径分布をもつ場合にはどのような差が現れるかを数値計算により検討しておく。

粒径分布は式(18)に見られるように $\alpha$ を通して $K$ に影響を及ぼす。また式(8)からわかるように底泥の単位表面積当りの酸素吸収速度を与える $k'$ と、単位重量当りの酸素吸収速度定数 $k$ との関係にも影響を及ぼす。

$\theta=0.7$ ,  $u_* = 1 \text{ cm/s}$ , とし,  $D$ ,  $\nu$ に $20^\circ\text{C}$ における値を与える。粒径の分布が正規分布をすとして、平均値と標準偏差を仮定する。

いくつかの場合について $K$ を計算し粒径分布が存在しない場合との比較を行ったものを表-4に示す。いずれの場合にもほとんど差はみられない。このことは図-14において、 $d$ を変化させても $K$ にあまり変化がみられなかったことから推察しえる。

以上のように粒径については単一粒径として扱ってもそれほど問題はないものと考えられる。

## 5. 結 言

本研究では河川感潮部に堆積している底泥による酸素消費について、実験及びモデルにより検討を行った。

浮遊底泥粒子による酸素消費を、フラスコを用いたバッチ実験により調べた。その結果、約3時間で終了する化学的な消費と、その後も継続する生物学的な消費の2段階を示した。酸素消費速度定数を用いてこの結果を整理したところ、酸素消費速度定数は、底泥の強熱減率や間隙水中の第一鉄イオン濃度とよい相関を示した。また水温が上昇すると酸素消費速度定数も大きくなること

が示された。

水路実験の結果、堆積泥による酸素消費は浮遊泥によるものに比べて大きく、SSが $50 \text{ mg/l}$ 程度では10倍近くにもなった。

堆積泥による酸素消費は、水の流れによっても変化し、摩擦速度が大きくなると大きくなった。

底泥による酸素の消費を、底泥は球形の固体粒子であり、1つずつ分離して存在しており、酸素はその粒子表面から酸素濃度に比例して吸収されて、それが底泥層内の間隙水中の酸素濃度の鉛直分布に影響を及ぼすものとして、粒子周辺、間隙水、底泥層-水境界面を含めた酸素の拡散に関するモデルを構築した。実際の底泥は種々の形状をしており、内部にも水分を含んでいる。また底泥より間隙水へ溶出した溶解性物質による酸素の消費も考えられる。これらの複雑な現象を、ここでは固体球形粒子の表面における酸素吸収として単純化して扱った。底泥内部に水分を含んでいる場合には、本研究中で行ったような、泥を乾燥して求める重量含水率から体積含水率を求めることは、必ずしも適切であるとは言い難い。このようにモデル化とその適用段階において、大胆な仮定をいくつか行っているが、これにより理論展開が可能になり、底泥の粒径、底泥粒子による酸素消費特性、含水率、流速の影響等を含めた堆積泥による酸素消費モデルを導くことができた。

その結果得られた式は実験結果をよく説明できるものであった。さらに堆積泥による酸素消費に及ぼす、底泥粒子の酸素消費速度定数、粒径、含水率、底泥-水境界面の摩擦速度の影響について検討した。

以上のようにここでは、従来個々の現地における底泥について定性的にしか扱われてきていなかった酸素の消費を、底泥上の水の流れの影響をも含めて一般的、定量的に扱う方法を考案した。底泥の酸素消費特性を総合的に表す指標として、浮遊攪はん状態にした泥の3時間の酸素消費より求める酸素消費速度定数を用い、中央粒径あるいは平均粒径のような代表粒径、含水率と、流れの状態を摩擦速度で表すことにより、堆積泥の酸素消費を見積もることができる。現実的には底泥の特性は深さ方向に変化するものと思われるが、その場合には水質に影響を及ぼすと考えられている表面数 $\text{cm}$ 程度の泥を採取し、上記のパラメータ値を求めればよい。底泥の堆積状態及びその特性の性格からいって、ある程度平均的な取扱いはなることはやむを得ず、むしろその方が精度のバランスからみても適切であるといえよう。

本研究を進める上で助言指導を賜った、徳島大学工学部建設工学科三井宏教授、中野晋講師、協力して頂いた元学生山口隆史氏(現住友建設)に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 杉木昭典：水質汚濁，技報堂。
- 2) Knowles, G., et al. : Polarographic measurement of the rate of respiration of natural sediments, *Limnol., and Oceanog.*, 7, p.481, 1962.
- 3) Martin, C. and D. Bella : Effect of mixing on oxygen uptake rate of estuarine bottom deposits, *Jour. WPCF*, Vol.43, No.9, pp.1865~1876, 1971.
- 4) 茂庭竹生：底泥の酸素消費に関する室内実験，水質汚濁研究，第9巻，第4号，pp.231~238, 1986.
- 5) Streeter, H.W. : Effects of sewage discharge on streams, *Sewage Works Jour.*, Vol.3, p.713, 1931.
- 6) 左合正雄他：酸素による汚濁河川の悪臭防止に関する研究，第6回衛生工学研究討論会論文集，1970.
- 7) Levich, V.G. : *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Inc., 1962.
- 8) Davis, J.T. : *Turbulence Phenomena*, Academic Press, 1972.

(1991.9.24 受付)

## OXYGEN CONSUMPTION BY BOTTOM SEDIMENT

Yoshihiko HOSOI, Hitoshi MURAKAMI and Yasunori KOZUKI

The oxygen consumption by bottom sediment containing organic matter was examined. The oxygen consumption by suspended sediment particles showed two stages. One of them due to chemical consumption continued for about 3 hours, another one due to biological consumption for 3 days. The rate constant of oxygen consumption was calculated. Its dependence on ignition loss, water temperature and so on was examined.

The experiment of oxygen consumption by sediment was carried out using an experimental flume. According to the multiple regression analysis the oxygen transfer coefficient showed positive relationships with following

(1) shear velocity acting on water sediment interface, (2) water content of sediment, (3) rate constant of oxygen consumption of sediment particles, and negative relationships with size of sediment particle.

A model which estimates the oxygen transfer coefficient by shear velocity, water content, sediment particle size and rate constant of oxygen consumption by sediment particles was presented. The oxygen transfer coefficient obtained by this model showed a close agreement with the experimental results.

In this study, the method of giving a general and quantitative estimation of oxygen consumption by bottom sediment was presented.