

礫で構成された河床における物質輸送に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON MASS TRANSFER IN POROUS RIVERBED

長岡 裕*・大垣眞一郎**

By Hiroshi NAGAOKA and Shinichiro OHGAKI

Mass transfer mechanism in porous riverbed was investigated using chloride tracer method and a hotfilm anemometer in two experimental open channels which have porous media composed of 1.9 cm and 4.08 cm diameter ceramic ball respectively. Water depth to particle diameter ratio was about 1.7 and surface flow mean velocity was 3.9 cm/s-42 cm/s.

Flow over porous riverbed was found to have very high turbulent intensity near porous boundary, which was about 20 % of surface flow mean velocity in all hydraulic conditions. Values of vertical-direction diffusion coefficient in porous media increased with increasing surface flow mean velocity, and were found to have the distribution pattern in porous media which shows linear decrease with depth. Observed values of diffusion coefficient near porous boundary satisfied the theoretical relationship between diffusion coefficient and turbulent intensity.

Keywords: mass transfer, porous riverbed, diffusion, turbulent flow, self-purification

1. はじめに

河川の水質汚濁を解決する1つの有力な方法として、河川が本来もっている自浄作用を利用する手法が近年注目を浴びている。礫の表面に付着した微生物膜によって河川水中の有機物を分解し浄化を促進させる礫間接触酸化法の試み等¹⁾がその一例である。また、河川空間の親水機能が強調されるようになり、特に都市域においては人工河川等のせせらぎ空間の設計、建設も進められており、東京都の玉川上水、野火止用水では下水処理水を導入することによって「清流の復活」事業が行われた²⁾。以上の現況をみると河川の自浄作用を最大限に活用できるような河道の設計法を確立することが望まれている。

河床が礫等で構成されている場合、単なる平板の河床に比べ自浄にかかわる生物の付着面積が増加し、自浄作用を大きくさせることができる³⁾と考えられる。しかしそのメカニズムを定量的に明らかにするには礫層における水理学的特性、特に深さ方向の物質輸送のメカニズムを解明し、基質(有機物等)や溶存酸素の礫層深部への供給能力を評価する必要がある。また、河床の凹凸がも

たらす水面付近の乱流が溶存酸素の再曝気を促進する効果、河床付近の大きな乱れが水中の浮遊物質の沈降、底泥の巻き上げ等に与える影響、表層部が好氣的に保たれ深部が嫌氣的になることによる硝化、脱窒の同時進行⁴⁾等の現象に対しても河川の自浄作用を考えるうえでは考慮が必要である。

一方、公園等において親水空間を形成する人工水路等は一般に非常に浅い流れとなっており、たとえば万博記念公園上津水路においては水深2 cm、流速33 cm/s、同下津水路では水深7 cm、流速40 cm/sとなっている⁵⁾。このような水路において路床に礫等を積み重ねた場合、水深と粒径のスケールがほぼ等しくなるという、通常の河川の場合と異なるかなり特殊な条件となる。

本研究は、水深と粒径のスケールが同程度になるような礫層を有する実験水路において、礫層内の物質輸送機構の解明を試みたものである。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験水路

実験には Fig. 1 に示すような透明の塩化ビニール製の大小2種類の開水路を用いた。大水路は長さ3 m、幅18 cm、小水路は長さ2 m 25 cm、幅18 cmで、それぞれ粒径4.08 cm、および1.9 cmの磁製球を最密充填に

* 正会員 工博 東京大学助手 工学部都市工学科

** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部都市工学科

(〒113 文京区本郷7-3-1)

7層積み重ねた礫層を有している。なお、粒径は平均値である。礫層の厚さは大水路で23.6 cm、小水路で11.5 cmとなっており、空隙率はそれぞれ36.2%、32%であった。実験はTable 1に示す12種類の水理条件について行った。Case 1~Case 9が大水路、Case 10~Case 12が小水路についての実験であり、粒径に対する水深の比を約1.7と統一した。水路は水平に保たれている。

(2) 拡散係数の測定

導電率の測定には4電極法を利用した導電率計(KENEK社製)を用いた。センサーはFig. 2に示すような大小2種類のをビニール銅線を用いて自作したものである。大小それぞれの水路に5個のセンサーを礫層の表面、1層目、2層目、…、4層目に埋め込み

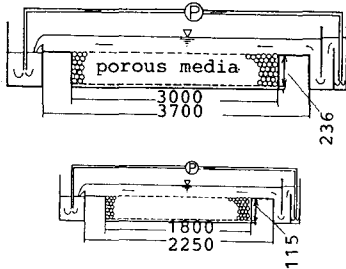


Fig. 1 Experimental open channels. (unit: mm)

Table 1 Experimental conditions.

	particle diameter (cm)	* mean velocity (cm/s)	friction velocity (cm/s)	depth (cm)
case 1	4.08	42.8	4.30	6.75
case 2	4.08	28.0	4.07	6.75
case 3	4.08	21.1	2.70	6.75
case 4	4.08	16.7	2.18	6.75
case 5	4.08	11.7	1.53	7.00
case 6	4.08	8.9	1.15	6.75
case 7	4.08	5.8	—	6.75
case 8	4.08	5.5	—	6.75
case 9	4.08	3.9	—	6.75
case 10	1.9	30.2	2.91	3.2
case 11	1.9	20.3	1.65	3.2
case 12	1.9	11.2	1.09	3.2

* :calculated from integral of velocity profile
 ---: could not be measured due to very small value of water surface slope

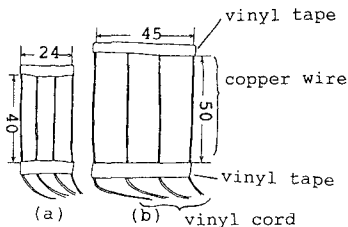


Fig. 2 Sensor for conductivity measuring in porous media. (a) -- case 1-case 9 (b) -- case 10-case 12 (unit: mm)

(Fig. 3参照), 前述の導電率計に接続した。また, Fig. 3中に示すように, センサー0とセンサー1で挟まれた領域における平均的な深さ方向拡散係数を K_1 , センサー1とセンサー2の間の領域の拡散係数を K_2 とし, 同様に K_3, K_4 を定義する。

水路の表流水を循環させながら塩水を下流側受水槽に瞬間的に投入し, 礫層表面の導電率変化(センサー0の出力)および礫層各深さにおける導電率の応答(センサー1~センサー4の出力)を測定した。導電率計からの5系列の出力電圧はAD変換の後にパーソナルコンピュータ(日本電気社製PC 8801)を通してフロッピーディスクに収納し, その後同PC 9801を用いて解析を行った。実験における導電率の範囲はおよそ $200 \mu\text{s/cm} \sim 600 \mu\text{s/cm}$ 程度(NaCl濃度0~200 ppm)であり, 密度流の影響は排除できると考えられ, 導電率と塩分濃度の線形性は確認した。また, 濃度と導電率の出力電圧の較正は毎実験ごとに行った。

本実験の場合, 粒径に対するセンサーのスケールが比較的小さく, センサーの埋め込み位置によって測定値に誤差が生じることが予想されるので, センサーの埋め込み位置を少しずつずらしながら同様の実験を5~10回程度繰り返し, 各センサーよりの出力を平均化したものを計算した。結果の一部をFig. 4, Fig. 5に示す。 c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 はそれぞれセンサー0~センサー4の出力を表わしている。縦軸の無次元導電率とは c_0 のピーク時の値で基準化した導電率である。両図から, 礫層内各層の導電率が水路水の循環に伴う礫層表面の導電率変化に対し, 1層目, 2層目, …, 4層目の順で次々と追従するように変化していることがわかる。

(3) 拡散係数の計算方法

礫層各深さにおける深さ方向拡散係数 (K_1, K_2, K_3 および K_4) の計算は以下の手順で行う。

礫層内の深さ方向物質輸送現象を一次元フィック型拡

personal computer conductivity meter

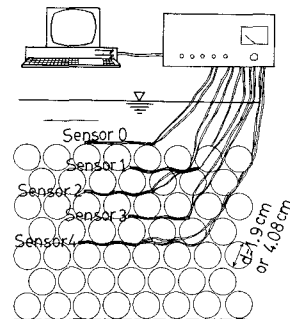


Fig. 3 Setting of conductivity sensors in porous media and definition of diffusion coefficient K_1, K_2, K_3 , and K_4 .

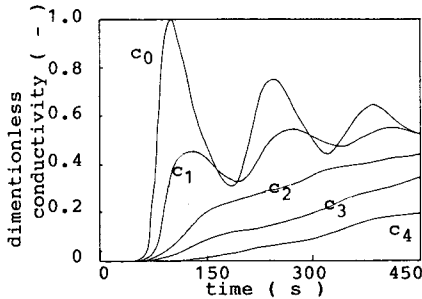


Fig. 4 Conductivity variation in porous media (case 7).

- c_0 ...surface
- c_1 ...1st layer from surface
- c_2 ...2nd layer from surface
- c_3 ...3rd layer from surface
- c_4 ...4th layer from surface

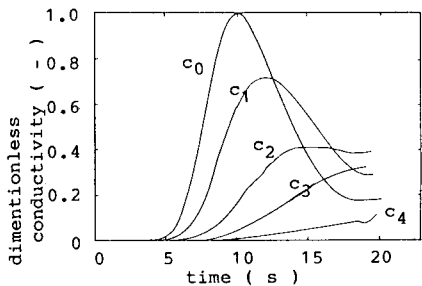


Fig. 5 Conductivity variation in porous media (case 10).

- c_0 ...surface
- c_1 ...1st layer from surface
- c_2 ...2nd layer from surface
- c_3 ...3rd layer from surface
- c_4 ...4th layer from surface

散方程式

$$\frac{\partial c(t, z)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c(t, z)}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

$c(t, z)$: 濃度, z : 距離 (深さ)

t : 時間, K : 拡散係数

で表わされるとする。ただしここでいう拡散係数とは鉛直方向の拡散と、球を迂回する流れの移流による物質輸送(分散)の両方を含めた包括的な見掛けの拡散係数である。いま、異なる拡散係数をもつ2つの層が $z=L$ で接し、上層側の拡散係数が K_1 、下層側が K_2 で与えられ、2層の境界面 ($z=L$) より L だけ上方の $z=0$ における濃度変化が $f(t)$ で与えられる場合を考える。境界条件は、

- $c(0, z)=0 \dots\dots\dots (2)$
- $c(t, 0)=f(t) \dots\dots\dots (3)$
- $c(t, L^-)=c(t, L^+) \dots\dots\dots (4)$
- $\lim_{z \rightarrow \infty} c(t, z)=0 \dots\dots\dots (5)$
- $K=K_1(0 \leq z < L) \dots\dots\dots (6)$

$$\left\{ \begin{array}{l} K=K_2(L < z < \infty) \dots\dots\dots (7) \\ K_1 \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=L^-} = K_2 \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=L^+} \dots\dots\dots (8) \end{array} \right.$$

となり、この境界条件の下で式(1)を解くと2層の境界面における濃度変化

$$c(t, L) = \frac{L}{(a+1)\sqrt{\pi K_1}} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b^n (2n+1) \exp\left\{-\frac{(2n+1)^2 L^2}{4 K_1(t-\tau)}\right\} d\tau$$

ここに、 $\left(a = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}, b = \frac{a-1}{a+1}\right) \dots\dots\dots (9)$

を得る。式(9)中の L を礫層中に埋め込んだ5組のセンサーの互いの垂直方向の距離と考えれば、この式によって、あるセンサーの出力 $f(\tau)$ が与えられたとき、それより L だけ深い位置のセンサー出力が示されることになる。たとえば $f(\tau)$ としてセンサー0の出力を考え、 K_1 として K_1 (センサー0とセンサー1に挟まれた層の拡散係数)、 K_2 として K_2 (センサー1の下層の拡散係数)を考えれば、式(9)の左辺はセンサー1の出力を示すことになる (Fig. 3 参照)。そこで実験で得たセンサー0の出力カーブ (実測値) および K_2 として適当な値を与えれば、式(9)で得られる曲線とセンサー1の実測曲線をフィットするようにして最適の K_1 を一義的に定めることができる。この場合に与えるべき K_2 の値はセンサー1とセンサー2の出力を用いた同様のフィッティングによって K_3 の値から定められ、さらに K_3 の値はセンサー2とセンサー3の出力のフィッティングから K_4 の値を与えることによって求められる。センサー3より下方の拡散係数 K_4 は、式(9)で $K_1 \rightarrow K_2$ の極限をとり、

$$c(t, L) = \frac{L}{2\sqrt{\pi K_1}} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}} \exp\left\{-\frac{L^2}{4 K_1(t-\tau)}\right\} d\tau \dots\dots\dots (10)$$

を得てから、センサー3とセンサー4の出力のフィッティング操作によって同様に定められる。

以上4回のフィッティング操作によって礫層中の拡散係数 K_1, K_2, K_3 および K_4 を決定することができる。なお、計算値と実測値とのフィッティングにおいては実際の境界条件と上記式(2)~式(8)の理論解の境界条件(無限まで層が続いているとした点に関し)との相違を考慮し、導電率の立ち上がり時についてのデータのみを用いた。

(4) 流速および乱れ強度の測定

平均流速の測定には KENEK 社製プロベラ式流速計 (プロベラ直径 5 mm) を用いた。乱流計測には KANOMAX 社製ホットフィルム流速計を用い、プローブはコニカル型 (1231W) を使用した。データ処理は導電

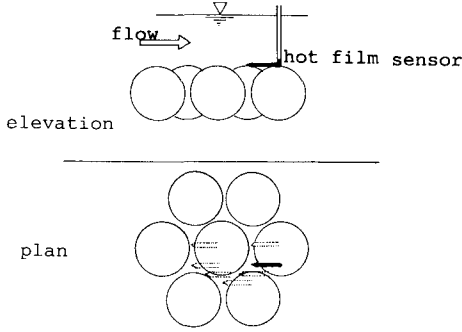


Fig. 6 Position of hot film sensor for measuring turbulent flow at porous boundary.

率の場合と同様に、AD 変換後にパーソナルコンピュータ内で行った。礫層表面の境界面における乱流計測においては Fig. 6 に示すように球の周囲の同一平面上 7 か所において測定した。測定結果は幾何学的な形状を考慮して重みをつけ平均化した。

3. 実験結果

(1) 礫層上の表面流の流速分布と乱れ強度分布

Fig. 7 に礫層上の流れの流速分布および乱れ強度（乱れの平方根 2 乗平均）の分布の一例（Case 2）を示す。比較のため同図上には同流量同水深の条件下での同じ水路を滑面にした場合（磁製球層の上を塩化ビニール板で覆った）の流れについての結果もプロットしてある。乱れ強度の測定の際の原データ数は 6 300、サンプリング周期は 0.002 秒である。流速分布を水深方向に積分した単位幅当たり流量が滑面と礫層とで異なっているが、これは礫層内を流れる浸透流の影響、乱れ強度が非常に大きい系におけるプロベラ流速計の信頼性の問題等が原因と考えられる。乱れ強度分布をみると礫層上の流れにおいては非常に大きな乱れが発生し、それが流れの表面付近に

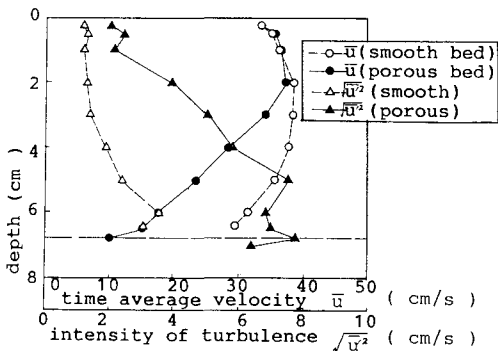


Fig. 7 Distribution of time average velocity (\bar{u}) and intensity of turbulence ($\sqrt{u'^2}$) in flow over porous bed and smooth bed (Case 2).

まで及んでいる様子がうかがえ、路床を礫層に変えることによって流れ全体の様子は大きく変貌し、非常に大きな乱れの支配する系が生じることがわかる。

(2) 拡散係数の計算結果

深さ方向拡散係数 K_1, K_2, K_3, K_4 と各水理条件における表流水平均流速との関係を両対数で表わしたものが、Fig. 8（大粒径, Case 1~Case 9）および Fig. 9（小粒径, Case 10~Case 12）である。また Fig. 10, Fig. 11 は K_1 で基準化した礫層内の拡散係数分布をそれぞれ大粒径, 小粒径の場合に分けてプロットしたものである。これらの図より、本実験の水理条件の範囲においては各層の拡散係数は表面流の平均流速の増加に応じて大きくなること、礫層内においては拡散係数の値は深くなるにつれてほぼ直線的に減少し、礫層表面から 3~4 層目においては 0~1 層目の約 10~50% の範囲の値を示すことがわかった。

(3) 礫層境界面における乱れ

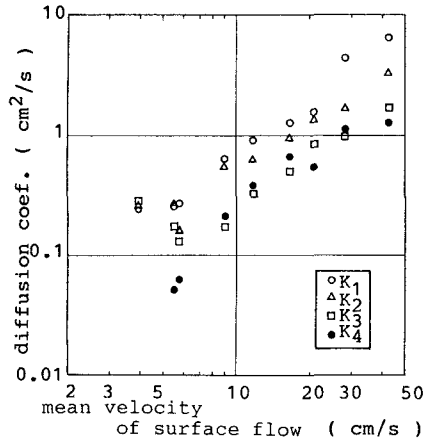


Fig. 8 Relationship between diffusion coefficient in porous media and mean velocity of surface flow ($d=4.08$ cm).

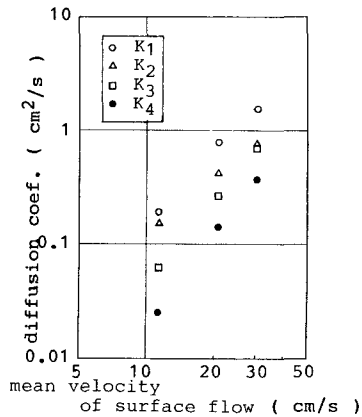


Fig. 9 Relationship between diffusion coefficient in porous media and mean velocity of surface flow ($d=1.9$ cm).

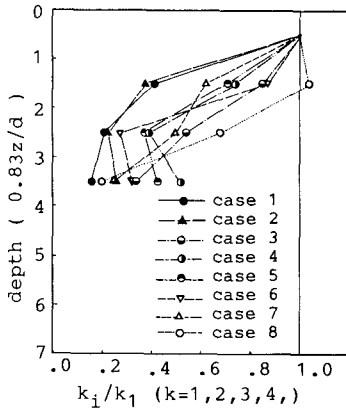


Fig. 10 Distribution of diffusion coefficient (ratio of diffusion coef. in each layer to K_1) in porous media ($d = 4.08$ cm).

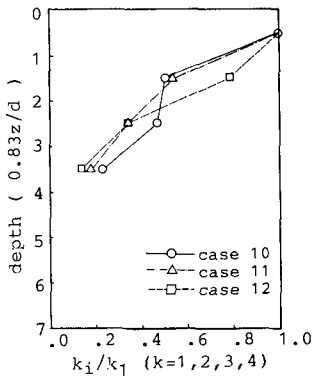


Fig. 11 Distribution of diffusion coefficient in each depth to K_1 in porous media ($d = 1.9$ cm).

Fig. 12に礫層境界面における乱流データの一例(大粒径, Case 2)を示す。これより流速変動に周期性があることがうかがえ、礫層境界面においては大きなスケールの渦が支配的であることが予想される。境界面付近にウォーターブルー粒子を落として流れを可視化した結果、球の周囲を回り込んで下方に潜り込む流れや、逆に下方から湧き上がる流れを観察しており、礫層境界面における粒径程度の大きさをもった渦の存在がうかがえる。Fig. 13は礫層境界面における乱れ強度と表面流平均流速との関係をプロットしたものである。この結果より通常の礫のスケール(直径2~5 cm程度)を有する礫層上の流れにおいては、表面流平均流速のほぼ20%程度の乱れ強度が礫層境界において発生していることがわかる。

4. 考 察

(1) 礫層境界面付近における深さ方向拡散係数の機

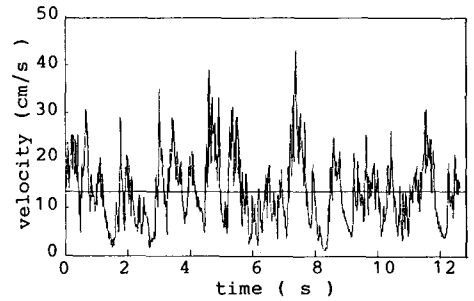


Fig. 12 Example of turbulent flow data at porous boundary (Case 2).

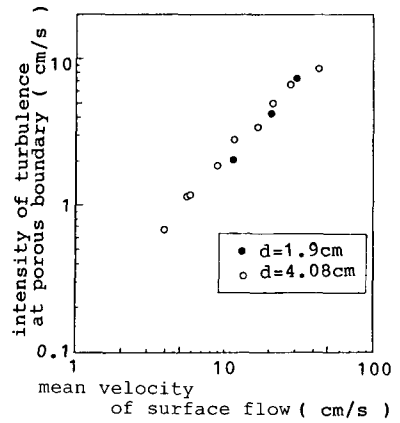


Fig. 13 Relationship between intensity of turbulence at porous boundary and mean velocity of surface flow.

構

礫層内における深さ方向拡散係数 K は、

$$K = l_0 \sqrt{u_z'^2} \dots\dots\dots (11)$$

l_0 : 礫層内における混合距離

u_z' : 流れの深さ方向変動成分

の形で表現できると考えられる。山田・川端^(6),7)は浸透層(礫層)内の混合距離として

$$l_0 = kB \dots\dots\dots (12)$$

$$B = \frac{2\lambda^2}{3(1-\lambda)} d \dots\dots\dots (13)$$

k : 定数

B : 浸透層内空隙スケール

λ : 浸透層内空隙率

d : 粒径

の形を考え、浸透層内の流速分布について理論的考察を加え、 k の値はおおむね1であることを実験的に示した。上式に従って本実験水路における礫層内混合距離を計算し、さらに乱れの等方性を礫層境界面において仮定し、

$$\sqrt{u_z'^2} = \sqrt{u'^2} \dots\dots\dots (14)$$

u' : 流れの主流方向変動成分

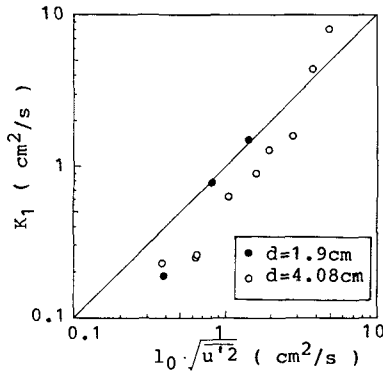


Fig. 14 Relationship between diffusion coefficient near porous boundary (K_1) and $l_0 \cdot \sqrt{u^2}$.

l_0 : mixing length in porous media
 $\sqrt{u^2}$: intensity of turbulence at porous boundary

を考慮して、礫層境界面における乱れ強度と混合距離との積と境界面付近における深さ方向拡散係数 K_1 をプロットしたものが、Fig. 14 である。この図よりプロットはおおむね

$$K_1 = l_0 \cdot \sqrt{u^2} \dots\dots\dots(15)$$

の線上付近に集まっており、本実験条件の範囲内においては礫層表面付近の深さ方向拡散係数が式 (15) で表現し得ることが実験的に示された。

礫層境界面における物質輸送のメカニズムを現象的に考えると境界付近の比較的大きな渦（粒径程度のスケール）が深さ方向への物質輸送を主に担っていると考えられる。従来^{8),9)}、凹型流路における水質交換モデル等で見られるように、フィック型の拡散方程式で説明せずに水質交換速度 q （速度の次元をもつ）を導入し物質輸送フラックスを

$$F = q \cdot (c_A - c_a) \dots\dots\dots(16)$$

F : フラックス
 c_A : 主流部濃度
 c_a : 死水部（礫層内）濃度

の形で表現する方法がとられてきているが、本論文で示されたように、フィック型の拡散モデルを導入し、大きな渦による移流をも含めた形での包括的な見掛けの拡散係数を考えても十分に輸送現象を記述し得ることがわかった。また、拡散係数と乱れ強度の関係より、さらに一般的な水理学的指標を用いて礫層における物質輸送の機構を記述する可能性が開けたと考える。

(2) 礫層における拡散係数の鉛直分布と水質浄化機構

礫層内に付着した生物膜による河川の自浄作用を解明するには礫層内の深さ方向の物質輸送機構と反応を担う生物の反応の大きさを知る必要がある。

礫層内に一様に生物膜が付着し、かつ深さ方向の拡散

係数が一様で深さ方向に分布がないと仮定すると礫層内の反応を biofilm 理論¹⁰⁾とのアナロジーで説明できる。考える生物反応が濃度に対し一次反応で表わせるとすると、定常状態を考えて、礫層内での濃度分布に関し、

$$K \frac{d^2 S(z)}{dz^2} = k S(z) \dots\dots\dots(17)$$

$S(z)$: 消費される物質の濃度（基質濃度）
 z : 深さ
 K : 深さ方向拡散係数
 k : 一次反応速度定数

が成立する。礫層表面 ($z=0$) における基質濃度を S_0 、礫層の厚さを L とすると $z = \xi L$ 、 $S = S^* S_0$ で式 (17) を無次元化し、

$$\frac{d^2 S^*(\xi)}{d\xi^2} = \frac{kL^2}{K} S^*(\xi) = \alpha^2 S^*(\xi) \dots\dots\dots(18)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{kL^2}{K}} \dots\dots\dots(19)$$

となる。この α は礫層内の基質濃度分布を決定づける無次元パラメーターである（biofilm 理論における“the biofilm constant”¹⁰⁾）。同パラメーターは拡散係数 K と一次反応速度定数 k との比の形をしており、この両者の大小関係によって礫層内の生物膜反応の機構が左右される。たとえば α が大きい（拡散に比して反応が大きい）と礫層表面付近で基質が消費されてしまい、深部まで十分に届かず、逆に α が小さい（拡散に比して反応が小さい）と礫層深部まで基質が届くことになる。

ところが本研究の結果から明らかになったように礫層内で拡散係数は分布している（Fig. 10, Fig. 11 参照）。さらに礫層内における水理学的諸条件（流速、乱れ等）の分布や基質濃度分布によって付着生物量も一様ではなく深さ方向に分布している³⁾と考えられ、一次反応速度定数 k も礫層内で一様とはいえない。礫層内の反応機構は以上のような複雑な要素が加わるため、実際は先に示したような biofilm 理論とのアナロジーで単純化することはできず、式 (17) の代わりにより一般的な式

$$\frac{d}{dz} \left\{ K(z) \frac{dS(z)}{dz} \right\} = k(z) S(z) \dots\dots\dots(20)$$

に従って解析しなければならない。拡散係数 $K(z)$ の分布については本研究の水理学的条件の範囲内では解明されたが、生物反応に関する速度定数 $k(z)$ の分布についてはまだ明らかになっておらず、今後の研究を待たなければならない。さらに考える基質が2種類以上ある場合は機構がますます複雑化し、たとえば窒素分布と溶存酸素濃度分布を考えて、礫層内で硝化、脱窒の同時進行の可能性を議論するには新たな解析が必要となる。

5. 結 論

以上の実験の範囲内の結論をまとめて箇条書きで記す。

(1) 礫を有する水路床上の流れは平板上の流れと大きく異なって礫層境界面において発生する非常に大きな乱れ強度にその特徴がある。礫層境界面における乱れ強度の大きさは、粒径1.9 cm～4.08 cm、表面流3.9 cm/s～42.8 cm/sの範囲内では表面流平均流速の20%程度である。

(2) 礫層内の深さ方向拡散係数は表面流平均流速の増大に伴って値が大きくなる。またその深さ方向の分布としては、礫層境界付近から深くなるにつれて直線的に値が減少し、境界から3～4層目においては表面流平均流速の10～50%程度の値になる。

(3) 礫層境界面付近における深さ方向拡散係数は、境界面における乱れ強度と礫層の空隙スケールとの積の形で表現できる。

謝 辞：本研究は文部省科学研究費補助金、鉄鋼業環境保全技術開発基金の研究助成、および財団法人小川育英会の研究助成を一部受けたものである。ここに謝意

を表します。

参 考 文 献

- 1) 建設省京浜工事事務所：野川浄化施設の効果，河川，457，pp.20～28，1984.
- 2) 津久井・菊地・紺野：清流の復活に関する研究（その1），東京都環境科学研究所年報1986，pp.114～119.
- 3) 長岡・大垣：礫で構成された河床における生物学的自浄作用，水質汚濁研究，Vol.9，pp.520～527，1986.
- 4) 長岡・中村・大垣：礫で構成された水路床における硝化脱窒機構，土木学会第42回年次講演会，pp.924～925.
- 5) 吉村元男・芝原幸夫：水辺の計画と設計，鹿島出版会，1985.
- 6) 山田 正・川端規之：浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究，土木学会論文報告集，325，pp.69～80，1982.
- 7) 山田 正・川端規之：浸透層上の流れの抵抗則に関する実験的研究，土木学会論文報告集，325，pp.81～91，1982.
- 8) 松岡 譲・河川くぼみ部の水質交換特性について，土木学会論文報告集，280，pp.39～50，1978.
- 9) 八木俊策：凹部界面における渦の発生・成長と水質交換，第27回水理講演会論文集，pp.813～819，1983.
- 10) Harremoës, P. : Biofilm Kinetics In "Water Pollution Microbiology" (Edited by Michell, R.), Vol. 2, Wiley, New York, pp.82～109, 1978.

(1987.5.22・受付)