

1. まえがき

都市河川の底質はほぼ全域にわたって有機質汚泥でしめられており、この底泥は出水時はもちろん平常時でもかなりの量が流送されている。また都市河川の多くは感潮河川であるため、この場合には順流、逆流の繰り返しに応じて底泥は洗堀、浮流、沈降、堆積が複雑に生じているものと考えられる。このような底泥の流送は、物理的な観点から河川構造物の機能におよぼす悪影響や浚せつなどの汚泥除去対策に問題を与えるだけでなく、水質的な観点から底泥浮上が水質悪化におよぼす影響が必ずしも解明されていないための確な水質予測もできないことが予想される。これらの問題点の解決には河川、衛生の工学面はもちろん河川管理や工事の面からも広く考察せねばならないが、その最も基礎となる点は流れによる底泥の流送特性の解明にあると考え、ここ数年来著者が行なってきた調査と実験の結果を報告する次第である。

2. 現地観測と水路実験

底泥は有機質汚泥であるため、有機成分の含有状態によって粘着性などの土性が変わる。厳密には同一河川でも場所と時季によっても異なるわけで、このようなことが調査や実験をする上に一つの障害になっていた。しかしながら実際には後述のように、大都会の市街地河川では底泥の土性にある程度共通点があると予想され、調査を繰り返すことにより流送特性を掴み得ると判断される。対象河川は大阪の代表的な都市河川である寝屋川で、区間長約400mの放出大橋（上流側）と寝屋川大橋（下流側）を観測断面とした（図-1, 2）。この付近は矢板護岸の約3Kmの直線河川で、観測地点は中央部に位置する。観測日と観測時刻は次の通りである。

(I) 第1回調査 昭和47年3月10日 11時～16時

(II) 第2回調査 昭和47年6月11日 8時～16時

(III) 第3回調査 昭和48年5月20日 11時～19時

第1回調査では潮差が小さく低流速の状態で、第2回は落潮時で流速が増加する状態で、第3回は張潮時で流速が減少する状態で観測された。これらは共に前期天候が安定した極く日常的な流況である。なお、観測地点の上流約400m地点から守口地区の内水を排出する西三荘水路があるが、観測期間中排出を停止してもらっている。また就航による影響をきるため、第2回、第3回の観測は日曜日としている。

観測事項は流速（流量）と水位測定のほか、最も重要な事項として浮泥濃度を知らするための採水を行なった。これらはすべて20分間隔で観測している。採水器は写真に示すように、深さ方向に20cm

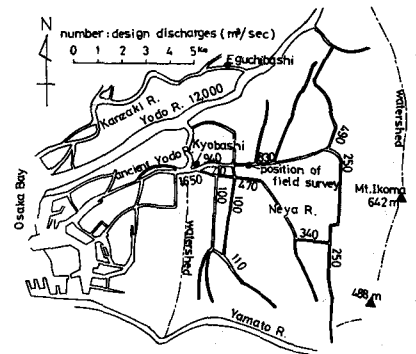


図-1. 寝屋川、神崎川の平面図

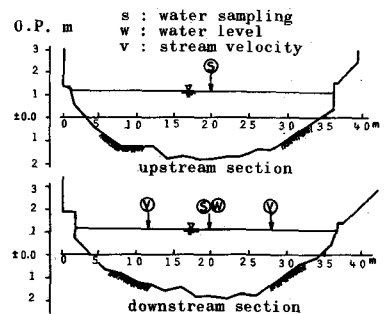


図-2. 観測地点の断面図

間隔で（容量は各 30 ml）3 m 区間で同時採水できるもので、採水資料は持ち帰って透光式の濃度計で浮泥濃度を測る。濃度検定には実際の底泥を低温乾燥させ、これを溶解させた基準液で検量線を作製するが、これは滑らかな曲線として得られている。

一方、水路実験は現地観測では得られない基礎的な流送特性を調べるために行なうもので、水路は図-3に示すように全長 17 m で、その中央部の 1.5 m 区間に汚泥床を作る。この汚泥は神崎川江口橋付近から採取したものである。実験で問題となるのは実験での堆積状態を現地のそれと同様にする点である。この再現方法として、汚泥床区間を締切りそこに必要量の汚泥を投入して水と混合し、自然に沈降させその堆積面を滑らかにかつ固定水路床と高さをそろえるように仕上げさせている。この作業は慣れれば簡単である。この堆積状況が現地のそれと一致しているかどうか疑問であるが、現地でも数時間毎に洗堀と堆積が繰り返されていることを考えるとそれほど相異するものではない。

寝屋川、神崎川から採取した生汚泥の比重は 2.52 ~ 2.68 であるが、これを H_2O_2 溶液で無機化したものの比重は 2.64 ~ 2.72 である。この資料をふるい分けおよび沈降分類した粒度分布が図-4である。図中 K_1^s 曲線は予め生汚泥を簡単な水槽で沈殿させ、その上層（約 2 cm 厚）の汚泥を H_2O_2 処理して得たものであるが、他の曲線はよく似通っている。別に両河川その他地点から採取した汚泥についても調べた結果同様の曲線が得られていることから、一般に都市河川底質は共通の粒度特性を有すると考えられる。また、その堆積層の上層はシルト成分（粒径 0.005 ~ 0.05 mm）が主体をなしていると考えられる。なお、採取汚泥の強熱減量比は 11.1 ~ 20.5 % であった。

3. 実験と調査の結果および考察

(1) 限界掃流力 実験水路に底泥を堆積させ通水後徐々に流速を増加させるとき、堆積表面が剥れるように流送されたり、剥れなくとも全面で流れ方向にか

すかな糸状のこん跡を残して活発に洗堀される状態が現われる。この状態を限界時と定義し、そのときの掃流力を限界掃流力とする。汚泥の採取は 2 ヶ月毎に一年を通じて行ない、採取後数日以内に実験を行なっている。また汚泥床区間で汚泥を沈降堆積させてから通水までの経過時間は 6 時間までで変化させて実験している。この結果は図-5に示す。掃流力を計算するときの粗度係数は、予備実験で

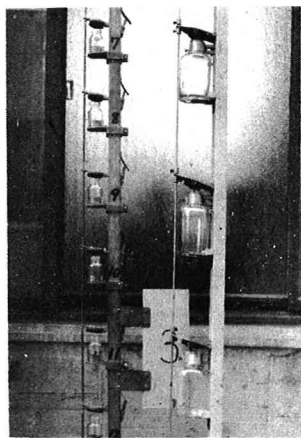


写真 採水器（左は浮泥濃度，右は BOD 用）

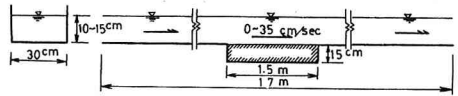


図-3. 実験水路

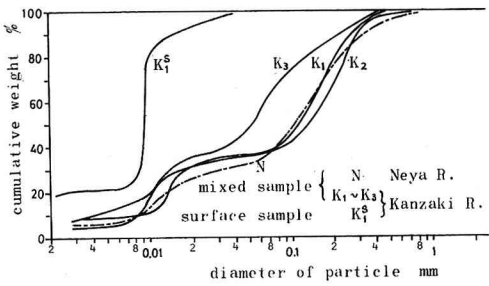


図-4. 無機底泥の粒度分布

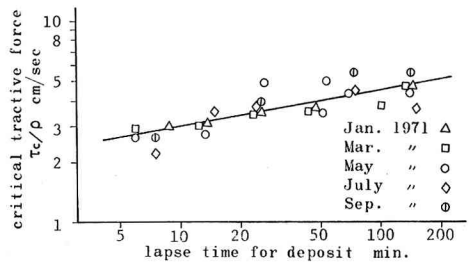


図-5. 限界掃流力

水路長全面に汚泥を敷いて求めた $n = 0.015$ を用いている。限界時の観察には多少の主観が入るが、図より堆積経過時間の増加に伴ない限界掃流力も増加の傾向を示す。現地河川で堆積経過時間がどの程度か詳らかでないが、日常的にはおよそ数時間とみられ、この範囲での限界掃流力は

$$\tau_c / \rho = 2 \sim 5 \quad (\text{cm}^2 / \text{sec}^2) \quad (1)$$

とみられる。この値はシルト質でしかも有機粘性をもつ都市河川底泥特有の値と考えられる。参考までに、細砂（粒径 0.1 mm ）の場合は 1.8 、粘土（粒径 $(2.5 \sim 6.1) \times 10^{-5} \text{ mm}$ 、Vane 値約 10 ）の場合は $1.20 \sim 30$ をとる。

一方現地観測によると、式(1)で表わされる限界掃流力は実際河川においてもほぼ妥当な値と考えられる。すなわち、図-6は寝屋川大橋（下流断面）で観測した水位、掃流力、および深さ方向に平均した濃度の時間変化を示したもので

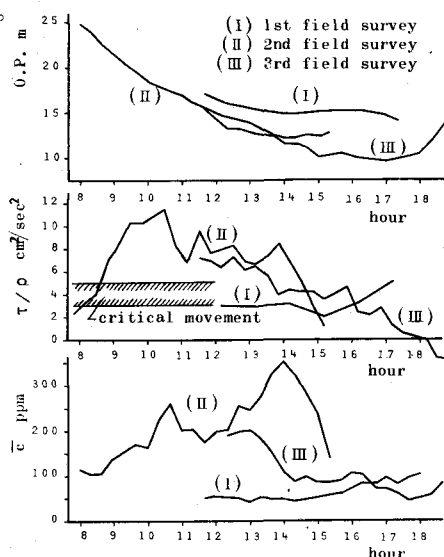


図-6. 水位、掃流力、平均濃度

あるが、第1回では掃流力が低いため濃度変化は認められず、第2回、第3回では掃流力の増減に対応して濃度変化が見られる。さらに図-7に示すように、第1回では深さ方向に濃度変化はなく、第2回、第3回では限界時と考えられる時刻を境に水底部で濃度が増加したり減少したりしていて、いずれも限界値以下では深さ方向に濃度は一様である。

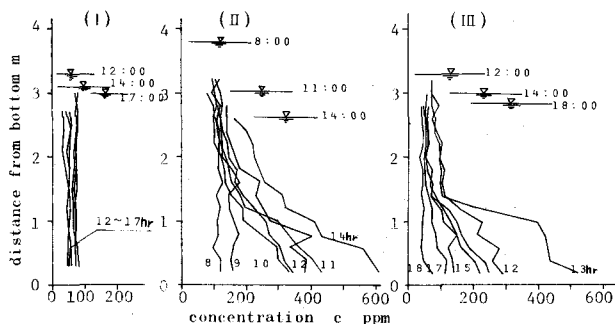


図-7. 鉛直方向の濃度分布（下流側断面）

(2) 洗堀輸送の状態と河床変化 限界掃流時およびそれ以上の流れの場で生ずる洗堀と輸送においてはほとんど掃流形式の移動は見られず、直ちに浮遊泥となる。これは限界時には多少とも粘性結合していた堆積表面が一たん流送されると、個々のシルト粒子に分散し、その場の流れがその粒子を浮遊させるに十分乱れているためであろう。このように流送は浮流形式をとるため、砂れんなどの河床波は観測されず、河床面が平らなままで洗堀が進行して行く。このことを現地河川で確かめるのは困難なことであり、また都市河川で河床波観測の資料は見当らない。ただ構造物の陰となる滞流部分、また河口や港内で沈降によるヘドロ堆積のあることはよく知られている。

(3) 鉛直方向の濃度分布 図-7の分布は下流側断面の観測を示したものであるが、上流側についてもその傾向は同じである。この濃度分布形は図-8に示すようなモデルで近似されるが、これと掃流力などの流況変化とを考え合せると、日常的な都市河川流においては底泥の動きと濃度分布との関連が次のような経過で起っているものと推察される。

a) 限界を越えない流れでは、短期間では変化のない c_0 の濃度で深さ方向

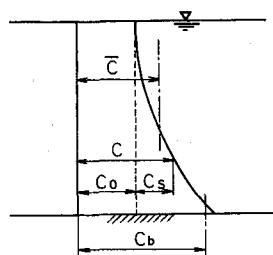


図-8. 分布のモデル

に一樣に分布している。これは wash load 的な浮泥による濃度と考えられる。

- b) 限界を越える流れでは底泥の洗堀浮上によって底部から濃度が増加し、 $(c_0 + c_s)$ の形となる。この c_s は Rouse 式の分布で近似し得る。²⁾

- c) このときの c_0 の値は短期的には (こ

こで云う短期とは、潮汐振動の半周

期すなわち数時間から半日程度と考えている) 変化しないことが、水面付近の濃度から判断される。すなわち図-9 は水底および水面の約 40 cm 区間の深さで平均した濃度分布を示したもので、水平濃度は観測時間を通じて顕著な変化はなくほぼ一樣である。

- d) 掃流力が減少する場合には c_s が減少し、限界値に近づくと c_0 に戻るようだ。限界値以下の流れでは濃度に変化はないと考えられるが、或いは沈降による微小な濃度減少があるかも知れない。

(4) 濃度の一次元解析 水質や汚染度を表示したり予測したりする場合には、通常断面の平均値を用いた一次元解析が行なわれており、またこれが便利である。浮泥濃度に関してもこの一次元解析で考察を進めるものとする。濃度の保存式は、水底 $Z = 0$ 、水面 $Z = H$ として

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (cu) + \frac{\partial}{\partial z} (-cw_g) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (\rho \overline{c'u'}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{c'w'}) \quad (2)$$

ここに、 c は浮泥濃度、 u は流速、 w_g は浮泥の沈降速度である。 c および u の深さ方向の平均値を $\bar{c}$ と定義し、 $c u$ の平均が $\bar{c} \bar{u}$ と近似されるものとする。また x 方向の分散係数が E_x で表わされると、式(2)を水底から水面まで積分したものは

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{c} \bar{u}) = \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}) + R \quad (3)$$

となる。 R は次式で表わされる。

$$R = \frac{1}{H} \int_0^H d(c w_g - \overline{c'w'}) = \frac{1}{H} [c w_g - \overline{c'w'}]_{z=H} + \frac{1}{H} [-c w_g + \overline{c'w'}]_{z=0} \quad (4)$$

右辺第一項は水面での、また第二項は水底での上下方向の泥粒の輸送量の差を与えるものである。特に水面での濃度は図-8 の記号に従って c_0 であり、 c_0 は短期的には一定と考えられるので第一項は 0 と考えてよい。この場合、水面で上方に乱れによる輸送量が存在することになるが、現実には水面は決して滑らかな平面ではなく渦の衝突や波があるため、沈降量に抗し得る十分な乱れが存在しているという考え方に立つ。一方第二項は底面の単位面積、単位時間当りの上向きの通過量を与え、この量を q_b で表わすならば

$$R = q_b / \rho H \quad (5)$$

特に、幅 B の長方形断面の河川では、 A (流水断面積) $= B \cdot H$ であるから式(3)が

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{c}A) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{c}A\bar{u}) = \frac{\partial}{\partial x}(E_x A \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}) + \frac{B}{\rho} q_s \quad (6)$$

で表わされる。 $q_s > 0$ であるとき沈降量を上回って洗堀が卓越して流れ方向に濃度が増加することを意味し、 $q_s < 0$ の場合はこれと逆である。従って現地観測において、掃流力が限界値を越えた第2回、第3回では上下流二観測断面

で平均濃度の差が観測されるはずであり、その結果を示したのが、図-10である。 q_s を求めるために、式(6)で近似的に分散項を省略し、差分して図-10などの資料を用いれば求められ、その結果を図-11に示す。一般に洗堀浮上量は

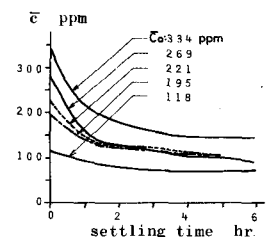
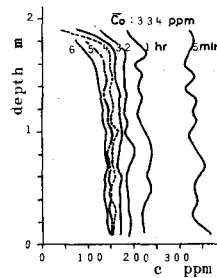
$$q_s = a (u_* - u_{*c})^k \quad (7)$$

で与えられるものと考え、図-11より u_{*c} を限界掃流力の下限 $\tau_c/\rho = 2 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ に対応してとるとよく表現でき、その式は

$$q_s = 2.7 \times 10^{-9} \{10 (u_* - u_{*c})\}^{1.2 \sim 1.5} (\text{ton}/\text{m}^2/\text{sec}) \quad (8)$$

で表わされる。なおこのような一次元解析の検証としての水路実験を若干行なったが、³⁾ 式(6)はほぼ妥当な表示とみられる。

(5) 沈降特性 流れが限界値 u_{*c} を下回るようなとき、沈降堆積が卓越すると考えられるが、これを詳細に調査することは困難であるため沈降筒による静水実験を行なった。⁴⁾ 沈降筒は深さ2m直径40cmの円筒で、深さ方向に10cm間隔で採水できる。汚泥投入後よく攪はんして濃度測定を行なうと、図-12に示すように、深さ方向には沈降



時間にかかわらず多少の勾配を有するがほぼ一様に分布し、また沈降時間が1~2時間で終局濃度となってしまう。従って掃流力が落ちた段階の流れではかなり早い時間で沈降が完了し、以後の濃度変化は極く緩慢であることが予想され、これは wash load とみられる濃度 c_0 がほぼ一定であることと結びつく。9回の沈降実験より代表的に1.5時間後の沈降速度を求めると $w_g = 0.008 \text{ cm}/\text{sec}$ 、それに対応する粒径は $d = 0.011 \text{ mm}$ となり、図-4と対比して、この粒径は河床表層に堆積するそれと対応し得る。これらのことより、都市河川における wash load の粒径限界は無機汚泥に換算して上記の程度であろうと考えられる。

4. BOD₅と浮泥濃度との関連

流れによって底泥の浮上や沈降が生じ、しかもそれが日常的に行なわれていることから、これが流水の汚染度におよぼす影響は非常に大きいと考えられる。筆者は流況によって左右される浮泥濃度と汚染指標として選んだBODとの関連をみるため、3回にわたる現地観測を行なった。BOD検定のため採水器は、前出の写真に示すように、深さ方向に40cm間隔で各500mlの採水びんを設置して同時開閉栓できるもので、これと浮泥濃度のための採水器を並べて寝屋川大橋で同時刻採水を行なっ

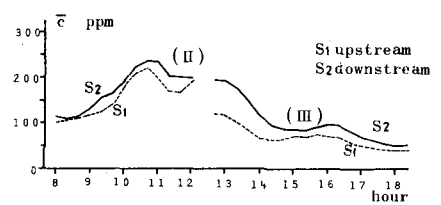


図-10. 二断面の濃度変化

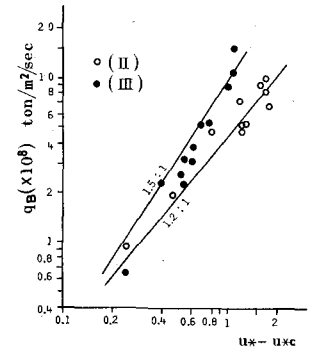


図-11. 底泥の浮上量

た。調査日は次の通りである。

(Ⅰ) 第1回 昭和48年9月25日

(Ⅱ) 第2回 昭和48年11月13日

(Ⅲ) 第3回 昭和48年12月12日

得られた分析結果の水深方向の濃度分布を示す。左右の図の同じ番号の曲線に対比すれば判るごとく、浮泥濃度とBODの分布形は同時刻で類似しており両者の間に高い相関があるようにみえる。もとより、汚泥は堆積状態と浮遊状態とは酸素消費量が異なるため、両者の間に量的

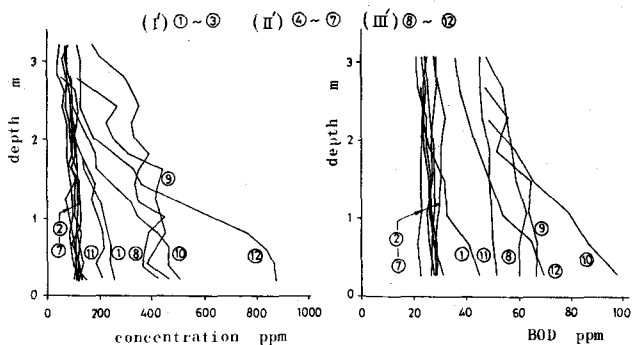


図-13 浮泥濃度とBODの分布

的な比例関係があるとは云い難いが、数時間もしくは半日程度の短期間では底泥が浮上する量に依りて流水中のBODが量的に関連づけられることが予想される。

このようにBODは上流から流入する長期的な汚濁負荷に関係するだけでなく、短期的には流れの掃流力によって変動する浮泥濃度に大きく影響されることに留意すべきである。したがって河道に沿う水質予測を一次元解析などによって行なう場合にも、これらの影響を十分考慮に入れなければならないであろう。

5. 結 び

宅地開発など市街地周辺で開発行為が進んでいる今日、それらから流出する微細な土砂や市街地流域そのものからの各種排水によって都市河川の底泥にかかわる問題が各所で生じている。海に出る前に何とかこれを処理する方法はないものかと基礎研究を始めたが、平常時の河道ではほぼその現象面が明確になってきたが解析的な面では未知の点が多い。また出水時の現象説明や水質におよぼす影響についても今後の課題は多い。

終りに、この研究に際し終始適切な御指導をいただいた 大阪大学 室田明教授に深く謝意を表したい。また実測に際し種々の便宜をはかっていただいた大阪府土木部都市河川課の関係各位にも甚大なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 岸, 山口, 武内: 「流れによる粘性土の洗掘破壊と水路の限界掃流」第22回年講 昭42.5
- 2) 村岡: 「河川底泥の浮遊特性に関する一考察」 関西年講 昭48.6
- 3) 村岡, 鳥生: 「流水中における底質汚泥の水理特性」 関西年講 昭47.6
- 4) 村岡, 三浦, 内田: 「流水における浮遊泥の沈降に関する実験的研究」 関西年講 昭48.6