

II-13 河口部ヘドロの流送特性(1)

建設省 土木研究所 正員 土屋 昭彦

馬場 洋二

学生員 佐々木 重義

まえがき

河川の上流から流送された微細粒子および工場排水や生活排水の流入により、流送能力の低減する河口部附近にて沈積する。沈積した土砂はヘドロ化(黒色を呈し悪臭をはなちかつ多量のガスを発生)し、公害問題とともに治水、利水、親水上、不都合かつ重大な影響をもたらす。これら社会的関心の高いヘドロに関する諸問題、特にここで取り扱う「ヘドロ河床の流送特性」については未だ十分な調査研究がなされていない現状である。このような意味において水底に堆積したヘドロの流れによる移動機構を把握することは、河口部、海域部の水質推定浄化および浚渫計画のうえできわめて重要な問題と考えられる。

1 研究目的

河床や湾内に堆積したヘドロの流れによる流送機構については従来種々の研究がある。そのうち、河床から水中への浮遊化については、河床面から斑状の剥離が生じ流水中に拡散浮遊すること、また掃流砂が存在しても全く無視出来る量であると報告されている。一方、流送量特性については環流実験水路中の浮遊砂濃度が時間的に一定の割合で増加しつづける。つまり、ヘドロ河床面の時間洗掘率が一定であるという実験結果が報告されている。これらの現象は従来の土砂流送理論と大いに異なるところで、従来の理論は粘性のない粒状の土砂の取り扱いであったのに対して、ヘドロは粘性を有すること、また比較的微細粒子からなる故と推論される。流送量に関して他にも、報告されているがデータにバラツキが多く量的に把握されていないと思われる。これはヘドロ河床面の堆積時間経過(圧密特性)により限界掃流力が異なること、そしてその定義にも問題を残していると考えられている。

種々の性質をもったヘドロの普遍的な流送特性の解明と将来の目標にしているが、今回は時間洗掘率が一定であるというバルテニアデスの実験結果を考慮してその実験の追試、および工学的観点から実際に浚渫や水質予知の対象となる区域のヘドロそのものについて、浮遊特性を観察し、限界掃流力および浮遊砂量を実験的に求め水理量と対応づけることを目的とした。

2. 実験に使用したヘドロの土質的性質

実験はかなり大量のヘドロを使用するので、主としてグラブ浚渫船の浚渫ヘドロを使用した。したがって採泥の時期、ヘドロの土質管理に若干の制約があり、ヘドロは霞ヶ浦(土浦附近)、鶴見川(河口-2.5km地点)およ

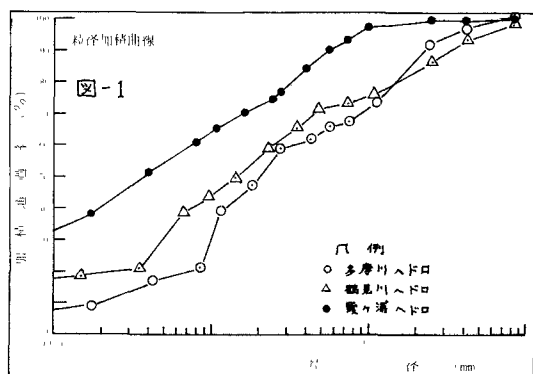


表-1 ヘドロの比重および平均粒径

採泥地点	比 重	平均粒径 $d_m^{(mm)}$
鶴見川ヘドロ	2.52	0.00924
多摩川ヘドロ	2.68	0.00947
霞ヶ浦ヘドロ	2.47	0.00240

ただし、比重は未処理で有機物(鶴見川ヘドロで乾燥減量で約10~15%)を含む。平均粒径 d_m は

$$d_m = \frac{\sum_{P=0}^{P=100} d \Delta P}{\sum_{P=0}^{P=100} \Delta P} \text{ より求めた。}$$

び多摩川（河口30^{km}地点）のヘドロが手に入った。霞ヶ浦ヘドロは茶系色を呈しかつ臭いが少なく含水比が非常に高く軟弱である。鶴見川ヘドロおよび多摩川のヘドロは典型的なヘドロで黒色を呈し強い悪臭がある。多摩川のヘドロは鶴見川のそれに比べてはるかに粘度が大きかった。採泥したヘドロには大きな石や貝殻、ガラス等の不純物も多量に含んでいた。実験にあたり、これらをできるだけ除けて行った。

流送問題を取り扱う上で重要なパラメーターであるヘドロ粒子の比重および粒度組成の実験結果は表-1および図-1のとおりであった。ここで比重試験は工賃試験法による比重試験 JISA-1202, 粒度試験は同じく粒度試験 JISA-1204 で H_2O_2 により分散して行った。

3 実験施設と実験方法

ヘドロ流送実験にあたり、ヘドロ特有のフロック状態が流速速度を支配し、浮遊砂量に大きく影響することから、現地河口部で起こるフロック状態にできるだけ近い状態での実験が望ましい。そのためには塩分濃度の管理が重要であり、またフロックの破壊の小さい実験水路が必要である。そこでフロックの破壊を少なくするため従来よく用いられる環流ポンプによる強制攪拌を避け、インプラーの推力による流送方法を用いた。またヘドロの流送形式は主に浮遊形式と考えられることから、一定の濃度分布を形成させるためにはある程度の流下距離が必要であることを考慮して環流水路（トラック形状）を用いた。

(1) 実験水路諸元

実験水路平面図、および断面図を図-2 (A)(B) に示す。

水路全長は28.5^mで直線区間20.0^m、弯曲部8.5^m（曲率半径1.35^m）から成り、水路断面は水路幅0.3^m、高さ0.4^m、直線試験区間においてはヘドロを0.05^m厚に敷き均すため他より0.05^m低くし高さ0.45^mとした矩形断面開水路である。

水路全体は鋼製で、試験区間の側壁は流送状態の観察および超音波流速計プローブ設置を助成して両面強化ガラス張りである。また両弯曲部において偏流がおこるのを避けるため整流板を有している。

(2) 流速制御方法

2台のインプラーを推力とすることによって平均流速 $V_m = 0 \sim 70 \text{ cm/sec}$, $U_{xc} = 0 \sim 7 \text{ cm/sec}$ を得ることができる。インプラー回転数は、無段変速機（ $0 \sim 1200 \text{ rpm}$ ）と減速機（ $1/40$ ）の組合せにより $0 \sim 30 \text{ rpm}$ を得ることができる。インプラーの羽根数は8枚とした。

(3) 流速測定

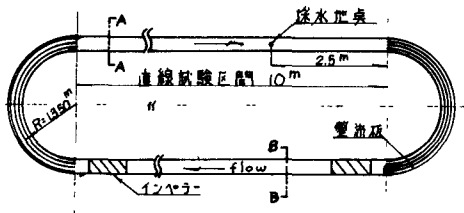
流速測定は超音波流速計（シンゲアラウンド方式）により水平方向平均流速が測定できる。この方法によると直接流体の中にプローブを入れられないことから、浮遊物質を多く含む流体に適し、また流速計による流れの乱れが起らない利点がある。設置したプローブの高さの水平方向の平均流速はリレー指示値10回の平均読み取り値をとった。ピトー管およびプロベラ流速計は使用不能であった。水深26^{cm}～32^{cm}の実験で水深方向に5点の流速を測定した。

(4) 採水方法と採水量

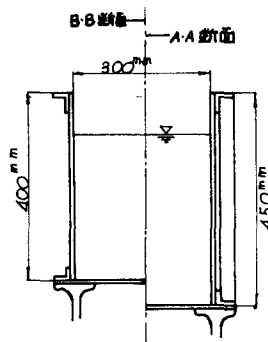
採水地点は試験区間上流より7.5^mの位置、水路中央で鉛直方向1点につき2個のサンプルを普通のサイフォン型採水管により約40^{cc}～45^{cc} 採水した。水深方向8葉のサンプルを採水した。

4. 浮遊濃度測定および浮遊砂量計算

図-2 実験水路平面図 (A) S:1/100



水路断面図 (B) S:1/10



浮遊濃度 C_0 は検水を蒸発皿に移し、工場排水試験法JISK-D102により次式から求めた。

$$C_0 = R - A \quad \text{ここで } R: \text{全蒸発残留物 (P.P.M)} \quad A: \text{溶解性蒸発残留物 (P.P.M)}$$

浮遊砂量は流速分布と濃度分布から次式により求めた。

図-3 浮遊砂量モデル図

図-3より

$$B_s = \sum_{n=1}^{n=q} B_n \quad B_n = V_n \cdot Z_n \cdot C_n \times 10^{-6} / (\sigma/p)$$

で表わされ、ここで B_s : 単位幅浮遊砂量 ($\text{cm}^3/\text{cm}/\text{sec}$)

n : 流れに対して鉛直方向に n 個に区分した区画番号

(河床から1, 2, 3, ……)

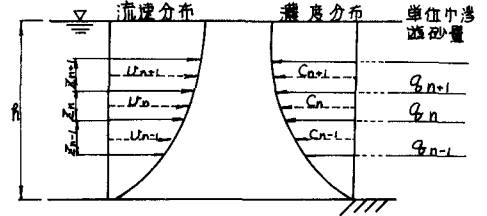
B_n : n 断面の単位幅浮遊砂量

C_n : n 断面の浮遊濃度 (P.P.M)

V_n : n 断面の平均流速 (cm/sec)

Z_n : n 断面の高さ (cm)

(σ/p) : 河床材料の比重



5 実験結果とその考察

(1) 平衡濃度について (ここで平衡とは河床面において $E_s \cdot \frac{\partial C}{\partial z} + W_b \cdot C = 0$ の状態という)

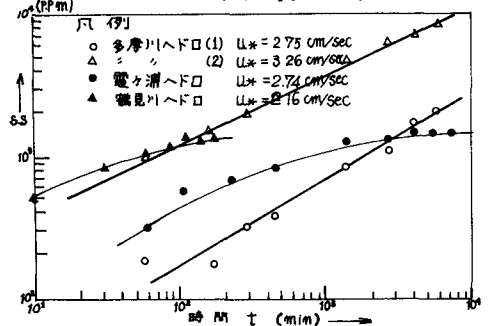
実験開始後の時間経過と浮遊濃度の関係を示したのが図-4である。濃度測定は水深方向に3点ないし4点採水しそれらの平均をもつてその時間の浮遊濃度とした。

図-4によると多摩川ヘドロ(1)(2)は流速を変えた2ケースとも両対数軌上で直線変化し、一方ほぼ同一粒径と考えられる鶴見川ヘドロの場合は120~180分で平衡濃度に近いものが現れている。また霞ヶ浦ヘドロは多摩川ヘドロと同程度の平均流速で実験したが4200分後に平衡濃度に近いものが現れた。おおよそ同じ流速で実験した場合でも霞ヶ浦ヘドロと多摩川ヘドロでは増加傾向が異なる。

これは少なくともヘドロの粒度組成(平均粒径)が原因していると考えられる。一方多摩川ヘドロと同程度の粒径をもつ鶴見川ヘドロの場合他ケースのものに比べて流速(摩擦速度)が小さいにもかかわらずかなりの浮遊濃度を示しているのは、各各ヘドロのもつ粘性(剪断強度、含水比)のファクターが原因していると考えている。

1965年バルテナアデスがサンフランシスコ湾のヘドロを用いて行った実験結果によると、浮遊濃度は時間経過とともに比例的に増加しており、我々のいずれの実験結果とも異なっている。

図-4 平衡濃度実験



(2) 浮遊砂量について

図-4で鶴見川ヘドロは実験開始後約3時間で平衡濃度に近い濃度に行るという結果を得た。実用的にこれを平衡濃度と仮定して水理量と浮遊砂量を対応づけるため鶴見川ヘドロのみについて実験を行った。ここで11ケース目にヘドロの入れ換えを行なっている。

図-5は C_s と B_{sx} の関係を示したものである。

今回の実験で得た C_s と B_{sx} の関係式は図から $B_{sx} = 210 C_s^{1.25}$ で表わされるようである。Brownの公式で与えられる流砂量よりかなり多い流砂量となるようである。ここで $B_{sx} = B_s / U_* \cdot d_m$, $C_s = U_*^2 / (\sigma/p - 1) \cdot g \cdot d_m$ である。この B_{sx} は実験時間が短いことを考慮すれば若干小さい値とも考えられる。実験ケース11, 12, 13は d_m に対する岩垣公式から計算される限界掃流力以下で流水させている。ここで $U_{*11} = 0.70 \text{ cm/sec}$, $U_{*12} = 0.79 \text{ cm/sec}$, $U_{*13} = 0.78 \text{ cm/sec}$ である。それにもかかわらず浮遊が起り、 $B_{sx} = 210 C_s^{1.25}$ の直線上にのるのは、河床材料の平均粒径より比較的細いものが浮遊していると考えられる。また河床表面の粒径が浮遊砂量に関係することから、いったん浮遊して次に前ケースの実験の掃流力以下で実験を行った場合、その表面に堆積しているヘドロの粒径をもって計算した(この場合河床材料に比する分け堆積があったと考える)。それはケース9, 10, 18, 19であ

る。この時の汚泥濃度はそれぞれ 5000 PPM 前後で、これはケース 6, 7, 8, 17, 20 と同程度の汚泥濃度を示しているが、これはケース 9, 10, 18, 19 の方が小さい。これはいったん汚泥が沈積した場合、ヘドロ中の縦断方向の粘着力に不連続な境界面ができたためと考えられる。

実験結果をケース別にみると、ケース 2~10 とケース 11~20 は $\beta_{sx} = 2.10$ の $\tau_*^{1.25}$ 線をはさんで上下に分かれる。これは 11 ケース目にヘドロの入れ換えを行なったため多少粒度組成に変化がある、たか、もしくは粘着力が異なったからと推定される。

(3) ヘドロの限界掃流力について

横十間川、鶴見川および霞ヶ浦の各ヘドロは含水比が高く粘着が比較的小さく柔軟である。これは浚渫から水路に敷き均すまでの繰り返しなど試料を乱した影響も考えられるが、採泥ヶ所が河床表面に近く、圧密経過時間が小さいようである。これらのヘドロの場合、その広い粒度分布により、平均粒径で計算した限界掃流力以下でも小粒径の部分が汚泥を起し見掛け上限界掃流力の存在が明確でなかった。一方多摩川のヘドロは粘着力が比較的大きく粒子間の結合が強いため、ある掃流力以上で急激に汚泥が起り、その意味では限界掃流力の存在が明確であった。多摩川の場合、その限界掃流力はここで採用した粒度分布決定法に基づく平均粒径に対応する限界掃流力よりはるかに大きかった。また前述のように、ここでは掃流は起らずいさなり汚泥が起り、汚泥が始まる点をもって限界掃流力と考えている。こうしたヘドロ移動河床の土質特性については、粒径の他に我々は粘度および粘着力の二つのパラメータを考え、調査を継続中である。

6 結論

(1) 平衡濃度実験については、従来研究されていたパルテナデスの傾向とはかなり異なった形で増加傾向を示し鶴見川ヘドロ河床においては平衡濃度とみなしてよいものと思われるものが得られた。そしてその現象は、河床材料の粒度組成、摩擦速度のほかに粘性（圧密程度）の影響因子が多分にあると考えられる。

(2) 鶴見川ヘドロの汚泥砂量は実用計算上実験開始後 3 時間目を平衡濃度と仮定して、 $\beta_{sx} = 2.10$ の $\tau_*^{1.25}$ で表わされると推定した。実河川では流れの境界面付近にきわめて流動性の高いヘドロ層が存在すると考えられている。こうした状態を実験水路内で再現することはきわめて困難なので、本実験では若干の圧密をうけ、比較的粘着力の大きいヘドロを実験の対象にした。従ってここで判明した流速特性は出水などによって汚泥層が流送された後の状況での使用が適当であろうと推察される。

参考文献

- 1) 村岡、島生：「流水中における底質汚泥の水理特性」土木学会年次学術講演会講演集、昭和 47 年 6 月
- 2) Partheniades, E.: "Erosion and Deposition of Cohesive Soils" Journal of the Hydraulics Division Proceeding of the A.S.C.E. Jan., 1965
- 3) 馬場、佐々木、伊藤：「ヘドロの汚泥拡散に関する研究」第 27 回建設省技術研究発表会、海域浄化に関する研究、建設省土木研究所、昭和 48 年 11 月

