

底泥の飛び出し量に関する研究

Study on the pick-up rate of cohesive bed material

国立公害研究所 水質土壌環境部 正員 ○ 大坪 国順
村岡 浩爾

1. ま え が き

著者らは、底泥の限界掃流力と底泥の物性との関係を実験的に検討してきた。これまでの研究によって底泥は流動特性・流送形態・静置状態によって2つのグループに大別され、そのおのおののグループにおいて底質によらず限界掃流力と粘度の間に一定の関係があることを明らかにした¹⁾

本研究は、底泥の流送問題の次の課題として、底泥の飛び出し量〔次元： $ML^{-2}T^{-1}$ 〕と掃流力との関係を実験的に明らかにしたものである。飛び出し量の評価の方法としては、床面での底質を1相の連続体として取り扱う方法と、底質を何らかの大きさ、形状をもった粒状体として取り扱う方法がある。ここでは、2つの方法によって実験データを整理し、その結果を報告するとともに、著者らが行った実験条件の範囲内では、底泥の飛び出し量は粒状体としての取り扱いで評価できることを示す。

2. 実験条件および方法

実験に用いた水路は、長さ7m×幅15cm×高さ5cmの長方形断面の透明アクリル製の管水路である。水路上流端から5m下流に長さ90cm×幅5cm×厚さ2cmの移動床部を設けた。飛び出し量を測定するためのレーザー濃度計を移動床下流端から約1m下流に設置した。レーザー光線の方法は水路横断方向で水平とした。また鉛直方向の濃度勾配を除去するために測定部の約30cm上流で強制的に混合させるようにした。実験において、水路を流下した水は系外に排水し、また飛び出した底質は移動床部に再び沈降・停止することがないために濃度計の出力は移動床部での飛び出し量に対応している。

実験手順はまず底質を移動床部に固定床部と同じ高さに敷きつめた後、床面を乱さないようゆっくり通水する。通水後は床面は原則的には整地しないが、床面への冠水の際、表面張力(?)によるひび割れや凹凸が著しい時はこて等で整地をした。流送実験は最初平均流速5cm/sから始め、上流側バルブをゆっくり連続的に開けてゆくことによって、30秒間もしくは60秒間の平均濃度とその間の平均せん断応力 τ との関係を求めた。予め、固定床実験によりバルブの開度と流量・せん断応力との関係を求めておき、バルブの操作のみで平均流速を1cm/minもしくは2cm/minの割合で増加させた。同時に渦流量計により流量を連続測定し、バルブの開度と流量の関係をチェックした。この実験方法では非定常流れによる付加せん断応力 $\Delta\tau$ の影響が懸念される。 $\Delta\tau$ の大きさは管路の非定常流における運動量方程式において動水勾配の値が平均流速と同じ定常流での値に等しいとすれば、 $\Delta\tau = \rho R (\partial u / \partial t)$ 、(ρ :水の密度、 R :径深、 u :断面平均流速)となる。 $\Delta\tau = \rho R (\Delta u / \Delta t)$ と近似して $\Delta\tau$ を求めた結果、 $\Delta\tau / \tau$ の値は 10^{-2} のオーダーとなり $\Delta\tau$ の影響は無視できる。実験は各底質に対して平均6通り含水比を変えて行ない、各含水比ごとに3回行なった。底質を敷いた後直ちに流送実験を行ない、以下の解析においては圧密等による底質の特性の変化は無視した。流送実験に用いた底質の種類と物性量を表-1に示す。表-1において、 d_{50} :中央粒径、 d_m :平均粒径、 σ_d :粒度分布の標準偏差、 σ :底質の真密度、v.s.s.:灼熱減量比、P.L.:塑性限界、L.L.:液性限界である。粒度分布はプロペラ攪拌させた試料を遠心力式併用型光透過式測定装置によって

表-1 実験に用いた底質とその物性

Mud	d_{50} (μm)	d_m (μm)	σ_d (μm)	σ (g/cm^3)	v.s.s. (%)	P.L. (%)	L.L. (%)
Kaolinite	5.5	6.5	4.7	2.60	—	38.5	51.1
Bentonite	10.0	16.4	16.8	2.48	—	33.0	186.5
Montmorillonite	0.8	2.1	2.2	2.60	—	45.3	354.0
Kasumigaura Mud	11.8	20.7	21.3	2.42	17.12	70.7	212.5
Kasumi.Sediment	24.9	27.7	18.8	2.28	19.00	77.7	321.9
Inbanuma Mud	9.5	15.4	14.5	2.51	10.64	69.0	206.0
Teganuma Mud	17.5	26.6	22.5	2.39	14.23	82.7	253.1
Ushikunuma Mud	11.5	17.3	13.1	2.36	16.41	84.0	208.8
Hinuma Mud	7.5	11.8	11.3	2.52	12.71	64.9	239.6

求めた。すべての底質において、 $d_{s0} < d_m$ 、 $d_m \approx \sigma_d$ の関係が認められた。

3. 実験結果の概要

図-1の一連の図は飛び出し量と掃流力との関係を示す。飛び出し量は、予め求めた濃度とレーザー濃度計の出力との関係曲線を用いて求めた。この曲線は採水によりチェックし、その誤差は5%程度であった。縦軸の P_s は $g/cm^2 \cdot s$ で定義される底質の水路面からの飛び出し量である。横軸は $dyne/cm^2$ で定義される底面せん断応力である。図-1の(a),(b),(c)はそれぞれベントナイト、カオリン、霞ヶ浦底泥の場合である。図中の*印は破壊限界以後の結果である。粘度が150 poiseと25 poiseのベントナイトを除いて P_s と τ の関係はかなり急な勾配になっている。この関係は他の底質の場合にも共通する。 P_s と τ の関係は、掃流力と限界掃流力の差が大きい場合の砂粒の飛び出し率と掃流力との関係に類似している。全ての底質において、粘度が小さくなれば(含水比が大きくなれば)同一の掃流力に対する P_s の値が大きくなること、また P_s と τ の関係の勾配が大きくなる傾向が認められた。さらに、粘度が10 poise付近の底質では破壊限界の掃流力で P_s が垂直に近い勾配となるが、粘度が小さくなるにつれてその勾配はゆるやかになり、3 poise付近以下では破壊限界前の勾配と変わらなくなる。この条件では破壊限界の判定も困難で、破壊限界の意義自体が存在しなくなる。

4. 底質の流送形態

底質の流送形態は底質の種類・含水比によって異なる。

1) ベントナイトの場合 ①. 移動限界付近の掃流力で、各含水比に共通して約5 mm 間隔のもや状の縦縞と、その間にうろこ状の横縞が現れる。掃流力の増加とともに消滅。 ②. 粘度が150, 25 poiseの底質で $P_s \propto \tau$ の関係の成立。その際に約2 mm 間隔の縦縞の存在。 ③. 粘度が25, 5 poiseの底質で波状河床が形成されて破壊する。波長3~5 cm, 波高2~3 mm。1~2 cm/s で下流へ移動しながら crest部が押し潰されて破壊。 ④. 粘度が0.8~0.5 poiseの底質で、移動限界前に波長3~4 cm, 波高0.5~1 mmの内部波が発生した。明確な破壊限界なし。

2) カオリン, モンモリロナイトの場合 ①. 両底質は破壊形態で類似点が多い。 ②. 粘度が3 poise以上では、上流端から5~10 cm 下流に発生しやすい横断方向のひび割れや凹地から偶発的に激しく破壊する。 ③. 粘度の低下とともにひび割れは観察されず、破壊し始める範囲が拡がり、ゆるやかに潰れるように破壊する。 ④. 顕著な波状河床は観察されない。

3) 現地泥の場合 ①. 初期河床は滑面上であり、小さな凸

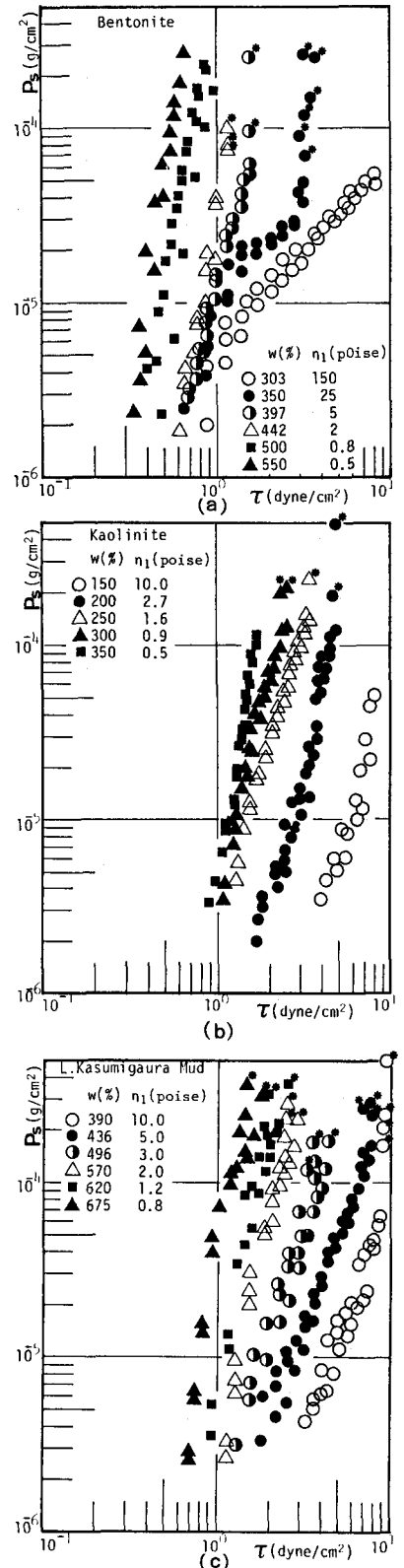


図-1 P_s と τ の関係

地から厚さ 0.5～1 mm，1～数 mm² の片鱗状ではがれ始める。表層がすべてではがれた後，あばた状の床面から微粒子や数百 μm の粒子状で全域一様に巻き上がる。②. 粘度が 7 poise 以上の場合は，ひび割れ部や小さな凹地から激しく破壊する。③. 粘度が 7～1 poise では上流端の 20 cm 程下流から全域に波長 8～10 cm，波高 3～5 mm の波状河床が形成され trough 部に横断方向のひびが生じて破壊する。粘度の低下とともにひび割れは小規模となり破壊も局所的で弱いものが各所で起こる。④. 粘度が 1 poise 以下では，波状河床は観察されず激しく巻き上がるが破壊限界は明確でない。今回の実験で観察された波状河床の波長等の特性が一般的なものであるかどうかは今後の研究課題である。

5. 実験結果の考察

底泥の飛び出し量の評価法としては，連行係数による表示と，無次元飛び出し率による表示が考えられる。前者は底泥を連続体と考え，底泥の巻き上げ現象を密度流のアナロジーとして捉える。しかし底泥の場合，相対密度が 0.1 程度と大きい点（モンモリロナイトと霞ヶ浦沈殿物を除く），相対粘度（底質と水の粘度比）が 50～1000 と非常に大きい点，さらに同一密度でも底質の種類により粘度が異なる点が一般的な密度流と異なる。一方，後者は底泥の巻き上げが何らかの大きさや形状をもった粒子状で起こると考える。この点では砂粒と同じ扱いとなるが，実際に飛び出す粒子径は平均粒径 d_m よりかなり大きいと考えられる点，粘着力の効果が大きく，限界掃流力 τ_c は通常の限界掃流力公式では評価できない点の問題となる。以下の実験結果の解析の際には， P_s の値が破壊限界後に垂直に近い勾配となったデータは除いた。

5-1 連行係数による表示結果

図-2 は霞ヶ浦沈殿物における飛び出し量の連行係数による表示である。 P_s/ρ_t が底質の連行速度となるので摩擦速度 u_* で除して連続係数 E を次式で定義した。

$$E = \frac{P_s}{\rho_t \cdot u_*} \tag{1}$$

ここで ρ_t は底質の見かけ密度である。横軸の $F_i'^2$ は掃流力 τ を代表値ととった内部フルード数の 2 乗値で

$$F_i'^2 = \frac{\tau}{(\rho_t - \rho)gh} \tag{2}$$

である。ここで， h は水深で 5 cm である。連行係数と内部フルード数の関係を

$$E = C_1 \cdot F_i'^\alpha \tag{3}$$

で表現すれば， $\alpha \approx 8$ と大きな値となり， C_1 の値が底質の粘度により異なり普遍表示されない。この傾向は他の底質にもすべて共通したものである。図-3 は牛久沼底泥における飛び出し量の連行係数表示である。縦軸の E は図-8 と同じ定義である。横軸の $F_i'^2$ は $(\tau - \tau_c)$ を代表値とした内部フルード数の 2 乗値で，

$$F_i'^2 = \frac{\tau - \tau_c}{(\rho_t - \rho)gh} \tag{4}$$

である。 E と $F_i'^2$ の関係を (5) 式で表現すると，

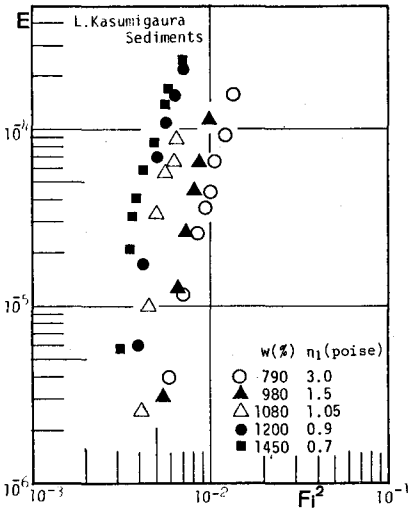


図-2 E と $F_i'^2$ の関係

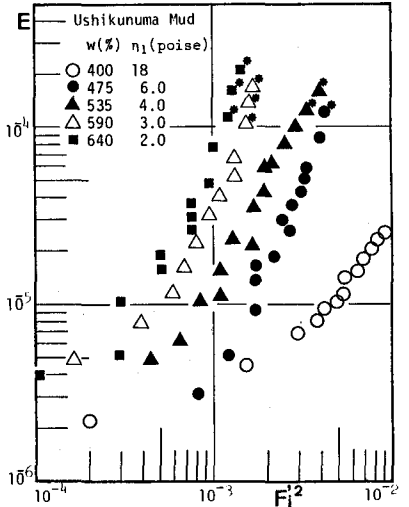


図-3 E と $F_i'^2$ の関係

$$E = C_2 \cdot F_1^\beta \quad (C_2: \text{比例定数}) \quad (5)$$

他の底質の場合も共通に、 $\beta \approx 2$ となるが、 C_2 はやはり底質の粘度に依存し、普遍表示されない。

図-4は各底質の粘度が3 poise付近のものを選び図-3と同様の表示法による結果である。粘度が同一でも C_2 の値は底質によって異なっており、これは粘度が ρ_t だけでは一義的に決まらない事実が反映している。現象的にも、50あまりの実験ケースのうちで、内部波が観察されたのはベントナイトの2ケースのみで、河床自体の流動が観察されたのは、ベントナイトの波状河床のケースの他には $\eta_1 < 0.8$ poiseの条件下の3ケースのみである。残りの実験では底質は何らかのスケールを持った粒子状(塊状)で飛び出すのが観察された。内部波が観察されないからといって直ちに密度流的な取り扱いが不適当と断定することはできないが、通常の連行係数の表示では底質の飛び出し量を規定できず、底質の粘度の効果を含んだ形に改良する必要がある。

5-2 無次元飛び出し率による表示結果

図-5は手賀沼底泥の飛び出し量 P_s と $(\tau - \tau_c)$ の関係を示したものである。ほとんどの実験ケースにおいて、 $P_s = 5 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2 \text{ s}$ の範囲で

$$P_s \propto (\tau - \tau_c)^r \quad (r \approx 2) \quad (6)$$

の関係が成立した。この関係が成立しないものは、ベントナイトの粘度が25, 150 poise, モンモリロナイトの5, 10 poise, カオリンの10 poise, 手賀沼の18 poiseの計6ケースである。 P_s と $(\tau - \tau_c)$ の関係の無次元表示を以下のように試みた。横軸には、 τ_c で抵抗力を代表させて、(7)式で定義される τ'_* を用いた。

$$\tau'_* = \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \quad (7)$$

縦軸は無次元飛び出し率であり、砂粒の場合と同様に考えれば

$$p_{s*} = \frac{A_2}{A_3} \cdot \frac{P_s}{\rho_0 d_0} \cdot t_0 \quad (8)$$

と定義される。ここで A_2, A_3 はそれぞれ粒子の面積・体積に関する形状係数、 ρ_0 は飛び出しの際の代表的粒子の密度、 d_0 は代表粒径である。 t_0 は基準時間で、次元解析的考察により(9)式

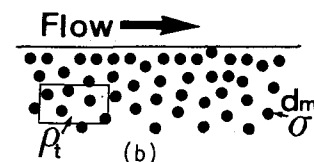
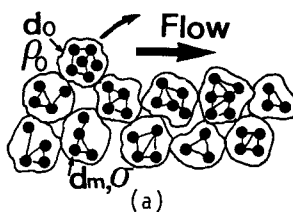


図-6 d_0, ρ_0 の概念図

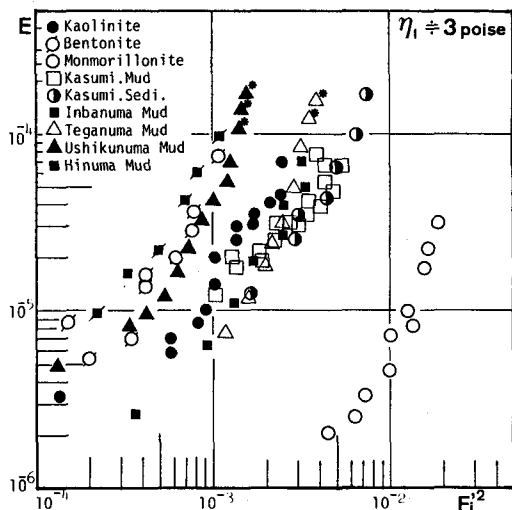


図-4 底質の違いによる E と $F_1^{1/2}$ の関係の変化

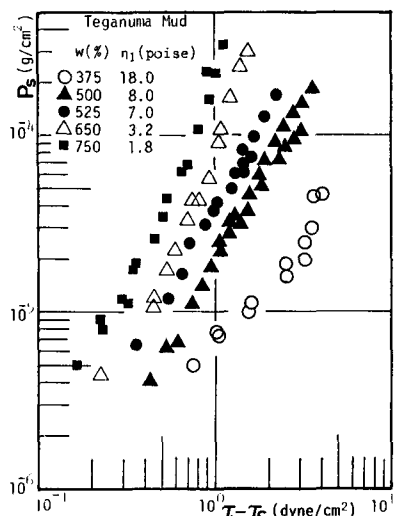


図-5 P_s と $(\tau - \tau_c)$ の関係

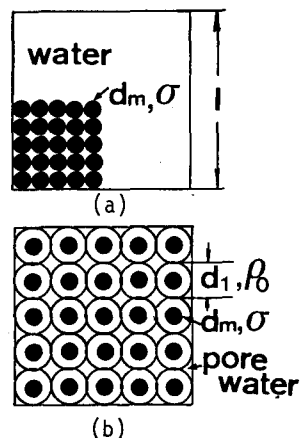


図-7 d_1 の概念図

で定義した。

$$t_0 = \frac{\eta_1}{(\rho_0 / \rho - 1) g d_0} \quad (9)$$

ここで η_1 は底質の粘度である。 t_0 は代表粒子が周辺の粒子のため η_1 に比例する粘性抵抗を受けながら粒径だけ沈降するのに要する時間に対応する量である。結局 p_{s*} は次式で計算される。

$$p_{s*} = \frac{A_2}{A_3} \cdot \frac{P_s \eta_1}{\rho_0 (\rho_0 / \rho - 1) g d_0^2} \quad (10)$$

ここで問題となるのは、飛び出しの際の代表的な粒子の密度 ρ_0 、粒径 d_0 、粒子形状の評価である。

図-6の(a)に ρ_0 と d_0 の概念図を示す。(b)は連続体と考えた場合の概念図で、平均粒径 d_m 、真密度 σ の微粒子が分散しており、見かけの密度が ρ_t となる。一方、(a)は粒状体として扱うために d_m の粒子の幾つかは何らかの構造で結合して粒径 d_0 、密度 ρ_0 の粒状となり河床に存在するとしたものである。いま河床における代表粒子の充填構造を単純立方体充填と仮定し、その間隙は水で満たされているとすると、 ρ_0 は(11)式で表現される。

$$\rho_0 = \frac{1}{A_3} (\rho_t - \rho) + \rho \quad (11)$$

(11)式によれば、 ρ_0 は粒径に無関係に評価できる。粒子が球形であれば、 $A_3 = \pi/6$ であり、立方体であれば $A_3 = 1$ 、 $\rho_0 = \rho_t$ となる。

d_0 の評価は次の2通り行なった。いま、体積 ℓ^3 の立方体を考える。 ℓ^3 中の底質の体積 V_s は次式で表わされる。

$$V_s = \frac{\rho}{\rho + \sigma (w/100)} \cdot \ell^3 \quad (12)$$

ここで、 w は含水比、 ρ は水の密度、 σ は底質の真密度である。よって ℓ^3 中に存在する平均粒径 d_m の底質粒子の個数 n は次式で表わされる。

$$n = \frac{\rho}{\rho + \sigma (w/100)} \cdot \frac{1}{A_3} \cdot \frac{\ell}{d_m} \quad (13)$$

しかし、粒径 d_m の粒子 n 個を単純立方体充填すれば図-7の(a)のようになる。そこで図-7の(b)のように n 個の粒子で ℓ^3 の体積を単純立方体充填で満たすことができる粒径 d_1 を求めて、これを代表粒径とする。

$$d_1 = \ell \cdot n^{-1/3} = \left\{ \frac{\rho + \sigma (w/100)}{\rho} \right\}^{1/3} \cdot A_3^{1/3} \cdot d_m \quad (14)$$

この方法によれば、代表粒径の中に、含水比、真密度、平均粒径の効果を評価したことになる。

他の1つの評価法としては、底質から飛び出す粒子の粒径は

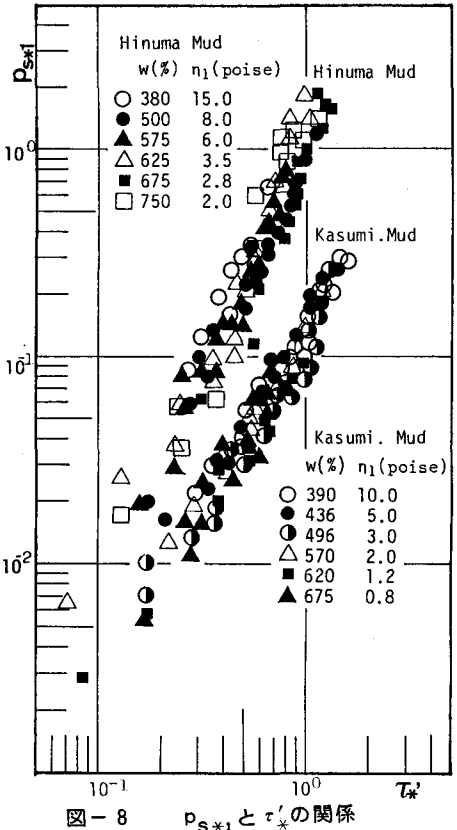


図-8 p_{s*1} と τ_{*}' の関係

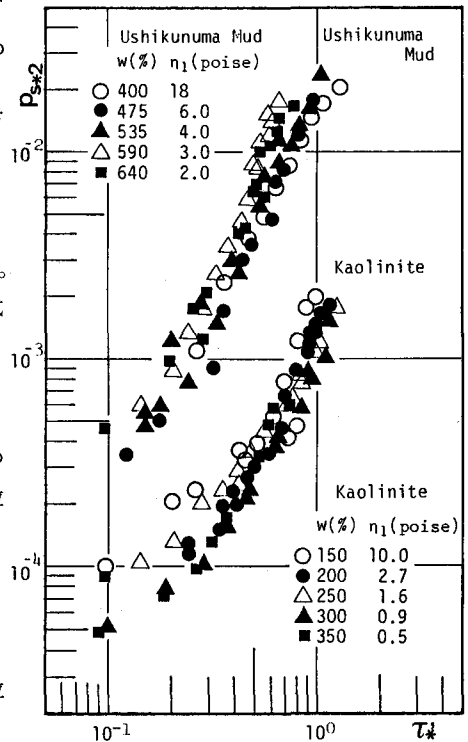


図-9 p_{s*2} と τ_{*}' の関係

微粒径から数百 μm まで混在していて底質の種類や含水比による違いが明確に識別できなかったこと、また特に現地泥の場合に表層のはがれる厚さや大きさがほとんど同じという観察結果から、代表粒径を一定値として便宜的に $d_2 = 200 \mu\text{m}$ としたことである。

図-8は代表粒子の形状を球と仮定し ($A_2 = \pi/4$, $A_3 = \pi/6$), (10)式における ρ_0 を(11)式で d_0 を(14)式で評価した時の無次元飛び出し率 p_{s*1} と τ_*' との関係である。底質は濁沼と霞ヶ浦底泥である。同一の底質において $\eta_1 < 10$ poiseであれば $0.2 < \tau_*' < 1.3$ の範囲で一定の関係式が得られ結果のパラッキも移動床現象としては比較的少ない。図-9は d_0 として $d_2 = 200 \mu\text{m}$ を用いたほかは図-8と同様に求めた p_{s*2} と τ_*' との関係である。牛久沼底泥とカオリンの結果を示した。図-8の結果と同様のことが認められる。図-8, 9の結果は他の底質でも共通に認められた。これらの結果から、同一の底質では代表粒径 d_0 の評価にあたっては含水比の影響は無視してよいと考えられる、図-10, 図-11は p_{s*} と τ_*' の関係をそれぞれ次式で表現した時の各底質の平均的直線を示したものである。

$$p_{s*1} = C_3 \cdot \tau_*'^2 \quad (d_0 = d_1, \quad C_3 : \text{比例定数}) \quad (15)$$

$$p_{s*2} = C_4 \cdot \tau_*'^2 \quad (d_0 = d_2, \quad C_4 : \text{比例定数}) \quad (16)$$

図-10は底質により C_3 の値がかなり変化することを示す。これは d_m の効果が2乗で大きいためである。図-11では、 C_4 の値が現地泥と粘土鉱物のグループでは1オーダー近く異なるが、各グループごとにはよくまとまっている。この結果から、粒度構成が同じ底質であれば d_m が多少異なっても、初期移動の次元で単位となる粒子スケールは同じと考えられる。今回の実験からはその大きさを明確に規定できなかったが、現地泥に対して $d_2 = 200 \mu\text{m}$ はオーダーとしては不適当でないを考える。粘土鉱物の C_4 が現地泥に比して小さくなった理由は明らかでないが、有機物の有無が流送時の代表粒子の特性に違いを与えられられる。層構造のため扁平な粘土鉱物と比較的粒状である現地泥の違いが、流送時の粒子の代表スケールや形状に影響を及ぼすと考えられる。

6. おわりに

本研究は、底泥の飛び出し量と掃流力との関係を実験的に明らかにしたものであり、得られた結果を要約すると次のようである。底泥の飛び出し量を評価するために連行係数による表示と無次元飛び出し率による表示を試みた。その結果、前者の表示法では同一の底質においては粘度による違いが現われ、同一粘度で比較すると底質の違いが現われて、現段階では有効な表示法となりえない。一方、後者の表示法においては底質の粘度の効果を考慮した基準時間を用いれば、底質の粘度が10 poise以下の条件で現地泥と粘土鉱物の各グループごとに、 p_{s*} と τ_*' の間に一定の関係が認められた。(但し、 $0.2 < \tau_*' < 1.3$)。今後の課題は代表粒径 d_0 の決定、粒子形状の評価、水温・泥温の影響評価、流送時の波状河床の特性の一般性についての検討、粘度が10 poise以上の条件の飛び出し量の評価、粒度構成の影響評価などである。

参考文献 1). 大坪, 村岡: 第25回水理講演会講演論文集, pp. 73-78, 1981

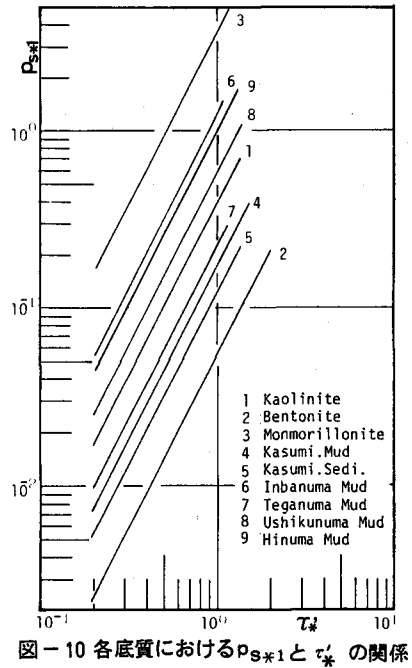


図-10 各底質における p_{s*1} と τ_*' の関係

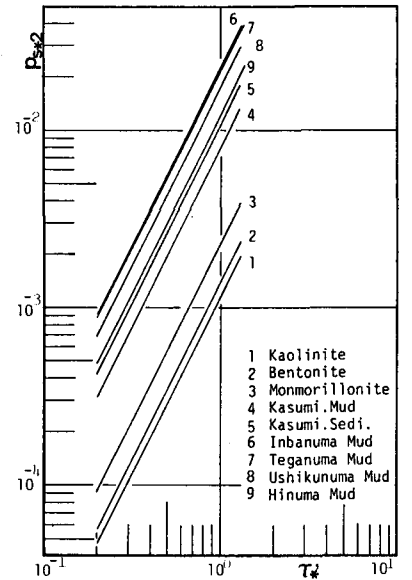


図-11 各底質における p_{s*2} と τ_*' の関係