

1. まえがき

著者らはこれまでの研究に依って、底泥の浮上現象では底泥を何等かの形と大きさをもった粒状体の集合として取り扱うのが適切であると結論づけた。底泥の浮上現象に関する基本量として底泥の限界掃流力と飛び出し率を取り上げ、それらの定式化を目指してきた。飛び出した底泥粒子の平均移動距離は、砂粒の場合と異なりかなり長い。そのため平衡状態に達するまでの距離が非常に長くなり、実河川では平衡状態に達する前に流れが変化してしまう可能性が高い。また濁溜などでは、浮遊時間が重要な因子となる。そのため底泥の場合は、平衡状態量としての流泥量（砂粒の場合の流砂量に対応する概念）より、むしろ飛び出し率のほうが重要となる。

底泥は粒子径が微細なため、表面力である粘着力が重力より卓越するのが特徴であり、そのため底泥の主要な流送抵抗力は、重力ではなく粒子間に働く粘着力である。しかし、その粘着力をミクロな粒子レベルで定量化することは非常に難しい。そこで、本来はマクロ的な連続体としての指標である底泥の粘度や降伏値を取り上げ、これらが粒子レベルでの粘着力をも代表する量と仮定して、底泥の流送抵抗力を評価した。その結果、底泥の限界掃流力は粘度と降伏値により実験的に定式化できた。また飛び出し率についても、既報¹⁾において次元解析的手法を用いてその無次元表示を試みた。そして粘度を用いた基準時間を導入することにより、一つの底泥では含水比条件によらず無次元飛び出し率と無次元掃流力の間に一定の函数関係を得た。しかし、関係式中の比例常数は、底泥の種類により異なった。本研究は既報¹⁾の成果を参考に、底泥粒子の初期移動において滑動に対する運動方程式を考え、それに基づいて底泥の無次元飛び出し率の推定式を誘導し、それを実験的に確認したものである。

2. 底泥粒子の初期移動機構のモデル化²⁾

底泥の飛び出し率を推定するにあたって、底泥を粒子の集合体とみなすならば、砂粒の場合と同様な考え方が適用できる。即ち、底泥粒子の離脱を時間のかかる現象と考え、粒子の離脱時間から飛び出し率 p_m を求める。砂粒との相違点は、底泥の流送抵抗力が重力でなく粘着力であること、高粘性のため慣性項が無視でき移動直後に平衡速度に達すること、さらに、初期移動形態が転動離脱ではなく滑動離脱であることなどである。さて、図-1に示される状態の粒子が、流れから力を受け河床面にそって滑動で離脱するものとする。粒子Aには抗力Dと粘性抵抗力R_vが作用すると考え、揚力と水中重量による抵抗力は無視する。粒子Aの流れ方向の運動方程式は次式で与えられるとする。

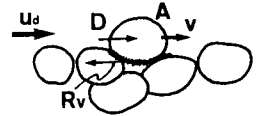


図-1 記号図

$$A_3(1+C_M)(\rho_0 - \rho)d_0 \dot{v} - k_3 A_1 \mu(u_d - u_c)d_0 + k_4 A_1 \eta v d_0 = 0 \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 A_3 : 体積に関する形状係数、 A_1 : 抗力および粘性抵抗力に関する形状係数、 C_M : 付加質量係数、 d_0 , ρ_0 : 離脱時の底泥の代表粒径および密度、 ρ : 水の密度、 k_3, k_4 : 比例常数、 v : 粒子速度、 u_d : 粒子近傍の水流の速度、 u_c : 限界速度、 η : 底泥の粘度、 μ : 水の粘度である。

$A_0 = (A_1/A_3) \cdot \{1/(1+C_M)(\rho_0 - \rho)d_0\}$ として式(1)を整理して解くと

$$v/v_0 = (1 - \exp(-k_4 A_0 \eta t)) \quad \dots\dots (2)$$

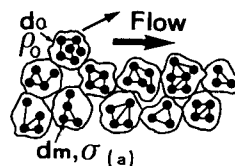
が得られる。ここで v は

$$v_0 = (k_3/k_4)(\mu/\eta)(u_d - u_c) \quad \dots\dots (3)$$

で与えられる平衡速度である。 k_3, k_4 の値は流体力と粘性抵抗力が粒子の上下半分づつに作用すると仮定して $1/2$ とした。底泥粒子が移動し始めてから $v/v_0 = 0.9$ となる時刻を t_p 、粒子が粒径分移動するのに用いる時間を T_d とすると、 $T_d/t_p \gg 1$ であれば粒子は移動開始直後から平衡速度で移動すると近似できよう。粒子を球形と仮定し、図-2に示す二つの状態での ρ_0, d_0 に対して T_d/t_p を求めて表-1に示した。表-1に示した t_p, T_d はそれぞれ最大、最小をとりうる条件で求めた値である。表-1より、粒子速度の関して上記の近似が成立することがわかる。

単位時間、単位面積当たりの底泥の飛び出し率 p_m は次式で与えられる。

$$p_m = (\rho_0 \hat{t}_0 / T_d)(1/\hat{t}_0) = \rho_0 / T_d \quad \dots\dots (4)$$

図-2 d_0, ρ_0 のモデル表-1 t_p, T_d の値

	ρ_0 (g/cm^3)	d_0 (μm)	$A_0 \times 10^4$	$t_p \times 10^{-2}$ (s)	$T_d \times 10^{-1}$ (s)	T_d/t_p
(a)	2.3	20	2308	0.002	2.34	1670
(b)	1.2	38	4155	0.001	6.33	6330

ここで、 $\hat{t}_0$ は底泥粒子の初期移動を考える際の剪断応力 τ の変動を捉える時間単位、 p_0 は $\tau > \tau_c$ (τ_c : 底泥の限界掃流力) なる確率、 T_d は底泥粒子の離脱時間である。底泥が $a_1 d_0$ (a_1 : 比例常数) だけ移動したときを離脱と考えると T_d は次式で与えられる。

$$T_d = a_1 d_0 / v_0 = a_1 \eta / (u_d - u_c) \mu \quad \cdots \cdots (5)$$

底泥表面は水理学的滑面であると仮定して

$$u_d = a_2 \tau d_0 / \mu, \quad u_c = a_2 \tau_c d_0 / \mu \quad (a_2: \text{比例常数}) \quad \cdots \cdots (6)$$

が成立つとする。さらに剪断応力の変動を考慮すると

$$T_d = (a/a_2) \eta \{ 1 / [E\{\tau | \tau > \tau_c\} - \tau_c] \} \quad \cdots \cdots (7)$$

となる。ここで $E\{\tau | \tau > \tau_c\}$ は $p_0 \hat{t}_0$ 時間内に作用する条件付き平均底面剪断応力である。底面剪断応力については中川、辻本³⁾と同様に正規分布するものと仮定して解析を進めると、 T_d は結局、

$$T_d = (a_1/a_2)(\eta/\bar{\tau}) \{ 1 + \delta_0 \Phi(y_c) / p_0 - \tau_c / \bar{\tau} \}^{-1} = (a_1/a_2)(\eta/\bar{\tau}) \cdot g(\bar{\tau}/\tau_c)^{-1} \quad \cdots \cdots (8)$$

となる。ここで $\bar{\tau}$, σ_0 , δ_0 : それぞれ τ の分布の平均値, 標準偏差, 変動係数, $\Phi(y)$: 誤差関数, $y = (\tau - \bar{\tau}) / \sigma_0$ である。改めて $\tau = \bar{\tau}$ と置けば、底泥の無次元飛び出し率は

$$P_{m*} = (\eta/\bar{\tau}) p_m = (a_2/a_1) p_0 \cdot g(\bar{\tau}/\tau_c) \quad \cdots \cdots (9)$$

で与えられる。図-2 は $a_1=1$, $a_2=0.75$, $\delta_0=0.5$ として、式(9)で与えられる無次元飛び出し率 P_{m*} と無次元掃流力 τ/τ_c の関係を示したものである。

3. 実験結果との比較

式(9)の誘導の過程では τ_c は τ_{c1} (流送限界²⁾) でも τ_{c2} (破壊限界²⁾) でもよくに支障はない。 τ_c としてどちらを用いるべきかは実験結果との対応の善し悪しで決めた。流送実験で求めた飛び出し量 P_m ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) と無次元飛び出し率 P_{m*} との間には次の関係がある。

$$P_{m*} = (\eta/\bar{\tau})(A_3/A_2)(P_m/\rho_0 d_0) \quad \cdots \cdots (10)$$

底泥粒子を球と仮定し ($A_3=\pi/6$, $A_2=\pi/4$), $\eta=\eta_1$ として P_m の実験結果から P_{m*} と τ/τ_c の関係を求めた。その一例を図-3に示す。 ρ_0 , d_0 としては、既報¹⁾でのモデル化に基づいて次式より与えた。

$$\rho_0 = (1/A_3)(\rho_1 - \rho) + \rho_1 \quad \cdots \cdots (11)$$

$$d_0 = \{\rho + \sigma(w/100)\}^{1/3} A_3^{1/3} d_m \quad \cdots \cdots (12)$$

ここで ρ_1 : 底泥の見掛けの密度, w : 底泥の含水比, d_m : 重量分布による平均粒径である。図-3には $\tau_c = \tau_{c2}$ とした場合の P_{m*} の推定式も併示した。推定式と実験結果の整合性はいずれの底泥の場合も良かった。一方 $\tau_c = \tau_{c1}$ となると、 $\tau/\tau_c > 1$ の範囲での P_{m*} の推定曲線と実験結果の曲線との整合性が問題となるが、それはよくない。即ち曲線の勾配が前者がかなり小さく値そのものは1オーダー近く大きい。

$\tau_c = \tau_{c2}$ とすれば、式(10)は意味の不明な実験常数を導入することなく、底泥の飛び出し率の推定式となる。但し、式(10)が適用できる範囲としては、第一グループの底泥²⁾で降伏値が $2 \text{ N}/\text{m}^2$ 以下の含水比条件に限定される。

5. 結 論

底泥の飛び出し量に関するこれまでの研究成果を基に、底泥の無次元飛び出し率を理論的に導いた。底泥の離脱過程において、粘度に比例する粘性抵抗が作用するとして粒子の滑動に関する運動方程式を導いた。そして、底泥の粘性が高いため移動粒子は直ちに平衡速度に達するとし、底泥粒子の離脱に用いる時間を評価した。これに流体力の変動を加味することによって粒子が離脱する確率を求め、底泥の無次元飛び出し率の推定式を導いた。この推定式は、底泥の種類、含水比の影響を包括し、実験結果とも良好に一致した。

なお、本研究は文部省科学研究費(奨励研究A 課題番号 57750479)の補助を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 大坪国順・村岡浩爾(1982): 底泥の飛び出し量に関する研究, 第26回水理講演会論文集, 141-146.
- 2) 大坪国順(1983): 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第42号
- 3) 中川博次・辻本哲郎(1975): 水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第244号, 71-80.

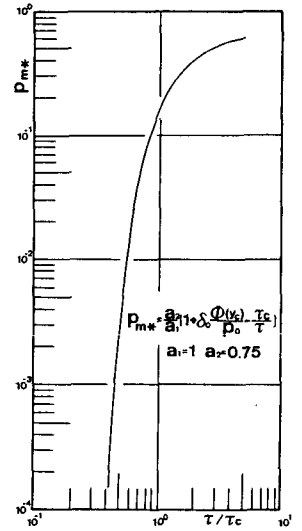


図-3 P_{m*} の推定曲線

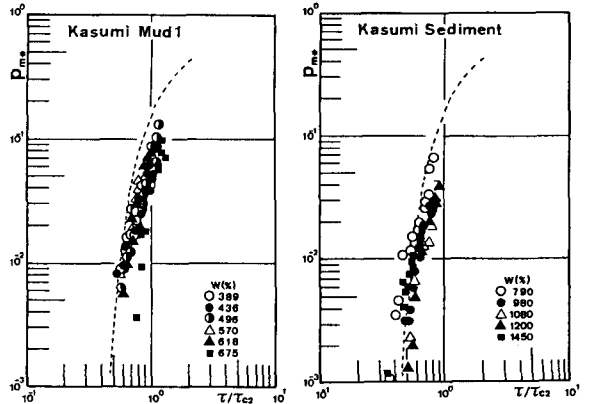


図-4 底泥の無次元飛び出し率