

(5) 河川底泥の巻き上がり現象に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON THE ROLLING-UP PHENOMENON OF RIVER MUD

滝 和夫*, 岡 正義*
Kazuo TAKI*, Masayoshi OKA*

ABSTRACT; The mechanism of the rolling-up phenomenon has not been sufficiently analyzed in that the sediment material is small, cohesive and of mixed organic matter. Numerous data obtained to date are from fragmentary or overall measurement on hydraulics and rolling-up rate. Consequently, the systematical study on the fundamental factors, to be used for forming a model of this phenomenon and to evaluate its appropriateness, has not been attempted. Therefore, the factors presiding over the phenomenon are considered in this paper, from the optimum combinations in many kinds of physical quantities with the dimensional analysis, and then the existence of sediment transport and density current in this phenomenon are explained with these nondimensional parameters.

Results are as follows: The coefficient of condition is combined with the 3rd power of nondimensional shear stress, the 6th power of Keuligan number and the -3rd power of friction velocity coefficient, and is related to the Galileo number. This coefficient is the most important parameter to determine the occurrence of sediment transport or density current phenomenon on the mud surface. When the water content in mud is decreased, the nondimensional rolling-up rate is proportional to the 1st power of nondimensional shear stress. On increasing the density and viscosity, the layer neighboring the mud surface grows with the mud which is supplied from the lower layer by shear stress, so that the three layer model is expected to apply in the concentration distribution. The sediment transport phenomenon is observed on the mud surface. In the other case, i.e., on increasing the water content, the nondimensional rolling-up rate is not only proportional to the 4th power of the nondimensional shear stress, but the density current phenomenon is observed on the mud surface. When these concentrations in the two layers (lower and middle) are of the same values, the middle layer becomes extinct, and is expected that a two layer model can be constructed.

KEYWORDS; Rolling-up Rate, Sediment, Cohesive Mud, Dimensional Analysis, River.

1. まえがき

河川底泥の巻き上がり機構を的確に把握することは、底泥からの栄養塩類や重金属類の溶出問題、あるいは底泥が浮遊物質となるために生じる水質汚濁等の解決に重要な意味を持っている。従来より底泥の流送現象は泥層表面に作用する流体力と底泥の抗力との競合現象としてとらえており、その解析には、底泥の限界掃流力や巻き上がり速度を底泥のビンガム降伏値やベーン試験値で、または、現象の掃流性および密度流性を考慮しての次元解析による無次元量表示が試みられている。また一方では、底泥層表面付近の流れが底泥粒子の移動に密接にかかわっていることから、ミクロな立場から粒子の移動モデルを組立てての議論がなされていることが多い。しかしながら、底泥の構成粒子が微細であるためコロイドの性質が強いこと、底泥の構成物質、水温、間隙水中の塩類濃度の相異等により性質が変化すること、また、流れの計測においてもその計測に困難さを伴うことが多い。そのために、モデルや値の妥当性の評価は底泥の性質の複雑さも加わ

*千葉工業大学 Chiba Institute of Technology

り、観測可能な総括的な巻き上がり量と平均的な水理量との関係を調べる方法をとっているのがほとんどのようである。したがって、現象のモデル化・評価の基本となる要因に対する系統的な把握が十分になされるまでに至っていないのが現状である。

本研究では、現象を支配している重要な物理量の抽出を次元解析の手法を用いて行ない、粘性のある底泥の巻き上がりのメカニズムを明らかにするとともに、この種の現象が含んでいる掃流的現象と密度流的現象との関係を明らかにすることを試みた。

2. 底泥の巻き上がり現象の概要

底泥の成分構成は多種多様であるが、基本的には土壌成分とはほぼ同様であると考えられる。主に、シルトおよび粘土礦物からなる無機成分、有機成分および生物から出来上がっている。この土粒子表面は負に電荷していることが多く、有機成分は粒子間の結合の大きな要因となっており、これら粘土・有機物複合体を形成している。泥層の含水比は通常 150～250 % 程度であるが、海底表面では 400 % にも達する。また、粒子径は約 100 μm ～1 μm 程度、粒度組成はシルト分 50～90 %、粘土 50～10 %、砂分 3～30 % で単位体積重量は 1.1～1.2 g/cm^3 、有機物含有量は 4～30 % と場所によって幅広い値をとる。¹⁾ 底泥の堆積構造は綿毛化構造、ランダム構造、配向構造をなしていることが多く、レオロジー的には降伏値が存在し、塑性的、粘弾性的およびビンガム流体的挙動を示すことである。

一方、底泥層表面の水流の状態によって、層表面は Phot. 1 にも見られるような、流下方向に筋状の縦縞を持つ現象と波状面を持つ現象の存在することが近年明らかになって来た。底泥の含水比の低い場合には、その表面は流下方向に筋状の縦縞を生じ表面をなめるように左右に揺れ動きながら流下し、その過程で流れの中に巻き上げられている。底泥層、縦縞を形成している層および流水層の間には不連続に近い濃度分布を示す。含水比が高くなると底泥層表面は不安定になり、上下層の比重差が 0.02 以下で内部波を生じるようになる。このような状態では、もはや縦縞はなく、重力内波を生じ波のクレストからスパイラル渦が発生するようになる。不安定さがさらに増すと、海岸の砕波のような波が形成され、底泥の巻き上がりも急激に増大する。この密度流的特性の存在はフロック泥を用いた栗谷ら²⁾ および霞浦泥を用いた大坪ら³⁾ の研究にも示されている。

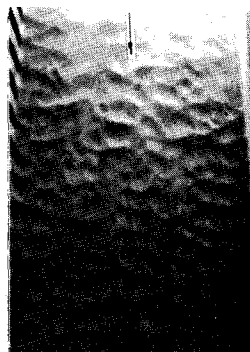
以上のことから、底泥の巻き上がり現象は縦縞を伴う掃流現象と内部波を伴う密度流現象の二現象が共存し、どちらか強い一方が現象を支配し底泥表面に種々の模様を作り出しているものと考えられる。ここで、底泥の巻き上がり現象が砂の掃流現象および気・液混相流や液混相流や液・液混相流に見られる密度流現象とは Table 1 に示す点で異なるのが特徴的である。

Table 1 Comparison between the rolling-up phenomenon and the noncohesive sediment transport or density current phenomenon.

	Rolling-up phenomenon
Points of difference in noncohesive sediment transport	• Dune, antidune and alternate bar are not observed on a mud surface. • Mud particles are provided with cohesive. • Particle size is small (1～100 μm).
Points of difference in density current	• Density difference between flow and mud layer is generated by the existence of mud particle. • Grain structure (random or flocculent structure) is appeared in mud layer. • Fluidity of mud is divided in non-Newtonian flow.



(a) $W_0 = 480 \%$



(b) $W_0 = 1100 \%$

Phot.1 State of mud surfaces acting on the water flow (mud material; bentonite. $R_{ew} = 10600$).

3. 従来の研究

底泥の巻き上がり量とせん断力との関係についての研究は数多くなされているが、中でも、Partheniadesより本格的な研究が始まったと考えられる。Partheniades^{4,5)}はサンフランシスコ湾の底泥（含水比 120 %，LL = 110 %）を用いて、せん断力と底泥の浮遊濃度との関係を実験的に検討した。その結果、巻き上がり量 q_s とせん断力 τ との関係式として $q_s \propto (\tau - \tau_0)$ をえた。ここで、 τ_0 は q_s と τ の関係を直線近似した時の $q_s = 0$ での τ の値である。一方岸ら⁶⁾は幾春別川の底泥を用いた実験で、底泥の巻き上がり量が $0.1 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{hr}$ を境にして $q_s \propto \tau^3$ ($q_s > 0.1$ の領域) および $q_s \propto \tau$ ($q_s < 0.1$ の領域) であるとしている。また、馬場ら⁷⁾は鶴見川泥および多摩川泥を用いて、単位幅当りの無次元容積巻き上がり量を q'_s として、 $q'_{s*} = 210 \tau_*^{1.25}$ ($q'_{s*} = q'_s / u_* d_s$) の関係を示している。しかし、馬場らの多摩川泥(2)のデータだけは式と異なった傾向が認められる。栗谷ら²⁾は底泥の限界掃流力が砂粒公式では評価出来ないことを実験的な検討から示した。細井ら⁸⁾は見掛粘度と見掛密度とを用いて次元解析的手法により無次元の抗力つり合い量を $F = (u_* d_s)^2 / \{ (\rho_s / \rho_w - 1) g d_s^3 / \nu_s^2 \}$ として表わしたが、一般的な関係式までには至らなかった。楠田ら^{9),10)}海田ら¹¹⁾の一連の研究は底泥の沈降、再浮上過程に関する実験を基にしたものであるが、その中で、巻き上がり量とせん断力の関係を $q_s = 6 \times 10^{-5} \cdot (\tau / \tau_c - 1)^{1.7} (g / \text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ (τ_c : 限界せん断力) をえている。また、大坪ら^{12),13)}は底泥と砂粒子との統一性を考慮して、底泥の離脱現象を「飛び出し」と定義した上で、その飛び出し量は粒状体としての取り扱いが適当であるとしている。

一方、村岡¹⁴⁾は都市河川における底泥の流送について、現地観測と室内実験を行なっている。その結果、水路実験から限界せん断力 τ_c は $\tau_c / \rho = 2 \sim 5 \text{ (cm}^2 / \text{s}^2)$ であるとし、巻き上がり量 q_s は現場観測より $q_s = 2.7 \times 10^{-7} \cdot \{ 10 (u_* - 1.41) \}^{1.2 \sim 1.5} (g / \text{cm}^2)$ をえている。

以上、Partheniades 以来、行なって来た研究の多くは実験・現象を基調として来たもので、その点、実験条件によって得られた結果も異なり一般性において十分満足されるまでには至っていないように思われる。

4. 解 析

河川底泥の巻き上がり現象は水流と泥層の種々の状態の組合せによって作り出される。そして、この機構を知るためには、泥粒子の物性、泥層としての特性および泥層表面を流れる水流の力を把握する必要がある。そこで、いま、現象にかかわる諸物理量を Fig.1 に示すような密度 ρ_w, ρ_s ，粘度 μ_w, μ_s ，流速 u_w ，摩擦速度 u_* ，水深 h ，底泥の粒子径 d_s ，底泥粒子の単位体積重量 τ_s ，巻き上がり量 q_s とすると、これらの関係式として、

$$f(g, \rho_w, \rho_s, \tau_s, \mu_w, \mu_s, u_w, u_*, h, d_s, q_s, (\tau_s - \rho_w), (\rho_s - \rho_w)) = 0 \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、添字 w は流水に関する値、 s は底泥に関する値を示す。(1)式を無次元項で表わすと、

$$\frac{q_{s*}}{\tau_*} = \phi \left\{ \theta^3, \left(\frac{\sigma_s / \rho_w - 1}{(\rho_s / \rho_w - 1)} \right)^3 G \tau_*^3, \frac{\sigma_s}{\rho_w}, \frac{\mu_s}{\mu_w}, R_{ew}, \frac{(\sigma_s / \rho_w)(100 + W_0)}{100 + (\sigma_s / \rho_w) W_0}, \frac{1}{\tau_*}, \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w} - 1 \right), \frac{1}{F_i^2} \right\} = 0 \quad (2)$$

をえる。ここで

$$\left. \begin{aligned} q_{s*} &= \frac{q_s}{\rho_w (\sigma_s / \rho_w - 1) u_*}, \quad \theta = \frac{\nu_s (\rho_s / \rho_w - 1) g^{1/2}}{u_w} \\ R_{ew} &= \frac{u_w h}{\nu_w}, \quad F_i = \frac{u_w}{\{ (\rho_s / \rho_w - 1) g h \}^{1/2}} \\ \tau_* &= \frac{u_*^2}{(\sigma_s / \rho_w - 1) d_s}, \quad G = \frac{g d_s^3}{\nu_s^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

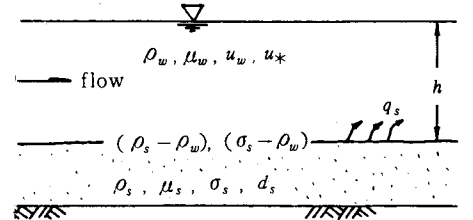


Fig. 1 Physical quantities concerned with the rolling-up rate

ν_w, ν_s は流水および底泥の動粘性係数。 W_0 は底泥層の含水比(%)であり、密度 ρ_s との関係は次式で示される。

$$\rho_s = \frac{\sigma_s (100 + W_0)}{100 + (\sigma_s / \rho_w) W_0} \quad (4)$$

いま、各物理量の値として底泥の巻き上がり現象が生じる範囲 $h = 10 \sim 300 \text{ cm}$, $u_w = 1 \sim 100 \text{ cm/s}$, $u_* = 0.1 \sim 10 \text{ cm/s}$, $\rho_s = 1.5 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_s = 2.5 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$, $d_s = 1 \sim 100 \text{ }\mu\text{m}$, $\mu_s = 10^{-1} \sim 10^3 \text{ g/cm}\cdot\text{s}$, $q_s = 10^{-8} \sim 10^2 \text{ g/cm}^2\cdot\text{s}$ とすると、(2)式の各無次元項のオーダは Table 2 のようになる。表より、 q_{s*}/τ_* , θ^3 および $(\sigma_s/\rho_w - 1)^3/(\rho_s/\rho_w - 1)^2$ ・ $G\tau_*^3$ の項が他と比較して変動範囲の大きいのがわかる。いま、現象の本質からみて、

Table 2 Exponent of nondimensional quantities

term	exponent	term	exponent
$\frac{q_{s*}}{\tau_*}$	-10~4	$\frac{\sigma_s/\rho_w(W_o+100)}{100+(\sigma_s/\rho_w)W_o}$	0
θ^3	-5~5	$1/\tau_*$	-2~4
μ_s/μ_w	1~5	$(\sigma_s/\rho_w - 1)$	0
R_{ew}	3~6	$1/F_i^2$	-1~5
$\frac{(\sigma_s/\rho_w - 1)^3}{(\rho_s/\rho_w - 1)^2} G\tau_*^3$	-8~1	σ_s/ρ_w	0

(2)式右辺 { } 内第3項以降の7変数に対して展開し整理すると、次式をえる。

$$\begin{aligned} \frac{q_{s*}}{\tau_*} = & \phi \left\{ \theta^3, \frac{(\sigma_s/\rho_w - 1)^3}{(\rho_s/\rho_w - 1)^2} G\tau_*^3, \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w}\right)_o, \left(\frac{\mu_s}{\mu_w}\right)_o, (R_{ew})_o, \left(\frac{\sigma_s/\rho_w}{100 + (\sigma_s/\rho_w)W_o}\right)_o, \left(\frac{1}{\tau_*}\right)_o, \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w} - 1\right)_o, \left(\frac{1}{F_i^2}\right)_o \right\} \\ & + \left\{ \frac{\sigma_s}{\rho_w} - \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (\sigma_s/\rho_w)} + \left\{ \frac{\mu_s}{\mu_w} - \left(\frac{\mu_s}{\mu_w}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (\mu_s/\mu_w)} + \left\{ R_{ew} - (R_{ew})_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial R_{ew}} + \left\{ \frac{\sigma_s/\rho_w}{100 + (\sigma_s/\rho_w)W_o} - \right. \\ & \left. \left(\frac{\sigma_s/\rho_w}{100 + (\sigma_s/\rho_w)W_o} \right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial \left\{ (\sigma_s/\rho_w)(100 + W_o)/(100 + (\sigma_s/\rho_w)W_o) \right\}} + \left\{ \frac{1}{\tau_*} - \left(\frac{1}{\tau_*}\right)_o \right\} \times \\ & \frac{\partial \phi}{\partial (1/\tau_*)} + \left\{ \frac{\sigma_s}{\rho_w} - \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (\sigma_s/\rho_w - 1)} + \left\{ \frac{1}{F_i^2} - \left(\frac{1}{F_i^2}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (1/F_i^2)} + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $()_o$ は各無次元項の代表値を、また ϕ の微分項 $\partial \phi / \partial (\sigma_s/\rho_w)$ は

$$\frac{\partial \phi}{\partial (\sigma_s/\rho_w)} = \left\{ \frac{\partial}{\partial (\sigma_s/\rho_w)} \phi \left(\theta^3, \frac{(\sigma_s/\rho_w - 1)^3}{(\rho_s/\rho_w - 1)^2} G\tau_*^3, \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w}\right)_o, \dots \right) \right\}$$

を意味する。他の変数による微分項も同様である。底泥の巻き上がり現象が掃流的現象と密度流的現象とを含んでいることから、(2), (5)式の各無次元項のうち、 $(\sigma_s/\rho_w - 1)^3 G\tau_*^3 / (\rho_s/\rho_w - 1)^2$ 項が最も重要であると考えられる。そこで、関数 ϕ が $G\tau_*^3$ 項の幕乗で表現できるものとし、 $G\tau_*^3$ 項の2次以上の項を無視して、

$$\begin{aligned} \frac{q_{s*}}{\tau_*} = & \frac{(\sigma_s/\rho_w - 1)^3}{(\rho_s/\rho_w - 1)^2} G\tau_*^3 \left\{ \phi(\theta^3, C_o) + \left\{ \frac{\sigma_s}{\rho_w} - \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (\sigma_s/\rho_w)} + \left\{ \frac{\mu_s}{\mu_w} - \left(\frac{\mu_s}{\mu_w}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (\mu_s/\mu_w)} + \left\{ R_{ew} - (R_{ew})_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial R_{ew}} \right. \\ & + \left\{ \left(\frac{\sigma_s/\rho_w}{100 + (\sigma_s/\rho_w)W_o} \right) - \left(\frac{\sigma_s/\rho_w}{100 + (\sigma_s/\rho_w)W_o} \right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial \left\{ (\sigma_s/\rho_w)(100 + W_o)/(100 + (\sigma_s/\rho_w)W_o) \right\}} \\ & \left. + \left\{ \frac{1}{\tau_*} - \left(\frac{1}{\tau_*}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (1/\tau_*)} + \left\{ \frac{\sigma_s}{\rho_w} - \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (\sigma_s/\rho_w - 1)} + \left\{ \frac{1}{F_i^2} - \left(\frac{1}{F_i^2}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (1/F_i^2)} + \dots \right\} \\ = & \frac{(\sigma_s/\rho_w - 1)^3}{(\rho_s/\rho_w - 1)^2} G\tau_*^3 \cdot \phi \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 C_o は(5)式右辺第1項 { } 内の第3項以降をまとめて表示したものである。また、(6)式と(5)式との関係は

$$\begin{aligned} \phi = & \phi(\theta^3, C_o) + \left\{ \frac{\sigma_s}{\rho_w} - \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (\sigma_s/\rho_w)} + \left\{ \frac{\mu_s}{\mu_w} - \left(\frac{\mu_s}{\mu_w}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (\mu_s/\mu_w)} + \left\{ R_{ew} - (R_{ew})_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial R_{ew}} \\ & + \left\{ \left(\frac{\sigma_s/\rho_w}{100 + (\sigma_s/\rho_w)W_o} \right) - \left(\frac{\sigma_s/\rho_w}{100 + (\sigma_s/\rho_w)W_o} \right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial \left\{ (\sigma_s/\rho_w)(100 + W_o)/(100 + (\sigma_s/\rho_w)W_o) \right\}} \\ & + \left\{ \frac{1}{\tau_*} - \left(\frac{1}{\tau_*}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (1/\tau_*)} + \left\{ \frac{\sigma_s}{\rho_w} - \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (\sigma_s/\rho_w - 1)} + \left\{ \frac{1}{F_i^2} - \left(\frac{1}{F_i^2}\right)_o \right\} \frac{\partial \phi}{\partial (1/F_i^2)} + \dots \end{aligned}$$

$$\phi \left\{ \theta^3, \frac{(\sigma_s/\rho_w-1)^3}{(\rho_s/\rho_w-1)^2} G \tau_*^3, \frac{\sigma_s}{\rho_w}, \frac{\mu_s}{\mu_w}, R_{ew}, \frac{(\sigma_s/\rho_w)(100+W_o)}{100+(\sigma_s/\rho_w)W_o}, \frac{1}{\tau_*}, \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w} - 1 \right), \frac{1}{F_r^2} \right\}$$

$$\approx \frac{(\sigma_s/\rho_w-1)^3}{(\rho_s/\rho_w-1)^2} G \tau_*^3 \cdot \phi \left\{ \theta^3, \frac{\sigma_s}{\rho_w}, \frac{\mu_s}{\mu_w}, R_{ew}, \frac{(\sigma_s/\rho_w)(100+W_o)}{100+(\sigma_s/\rho_w)W_o}, \frac{1}{\tau_*}, \left(\frac{\sigma_s}{\rho_w} - 1 \right), \left(\frac{1}{F_r^2} \right) \right\}$$

である。(6)式より、底泥の巻き上がり量 q_{s*} は無次元せん断力の4乗、ガリレオ数およびクーリガン数の関数 φ の積として表わせることがわかる。ここで、ガリレオ数 G は底泥粒子に働く浮力、慣性力および粘性力との関係を示す指標で、クーリガン数 θ 、無次元せん断力 τ_* および摩擦速度係数 C_f を用いて、

$$\frac{(\sigma_s/\rho_w-1)^3}{(\rho_s/\rho_w-1)^2} G = \left(\frac{C_f}{2} \frac{1}{\tau_* \theta^2} \right)^3 \quad (7)$$

と表わすこともできる。また、(6)、(7)式に含まれるクーリガン数 θ はせん断流れの境界層厚さに基づくリチャードソン数 R_i とレイノルズ数 $R_{e\delta}$ を用いて

$$\theta^3 = \frac{\rho_w u_w^2}{(\rho_s/\rho_w-1) g \delta} \left(\frac{u_w x}{\nu_s} \right)^{1/2} = \frac{R_{e\delta}^{1/2}}{R_i} \quad (8)$$

ここで、 δ は2層界面の接触点より x の距離までの界面に生じる境界層厚さであり、 $(\nu_s x / u_w)^{1/2}$ から求められる。このことから、粘性が泥層の安定限界に付加的に関与していると考えられる。したがって、このガリレオ数は境界層厚リチャードソン数あるいはクーリガン数を内在していることがわかる。一方、ガリレオ数 G は粘性を有する底泥粒子が層表面から巻き上げられるか否かを知るパラメータであるとも言える。また(7)式左辺項は底泥層、粒子および水の性質のみでできており、水流に関する物理量が互に打消されているのが特徴的で、Yalin のパラメータ Ξ ¹⁵⁾ と同様なものである。

底泥の巻き上がり現象に掃流的現象と密度流的現象とを合わせ持っていること、底泥の密度、比重等(6)式の変数 φ の無次元項7項の内、 θ 以外は変動幅が小であることから、 φ は独立変数 θ の関数と近似できるとすると、 φ の関数形は、掃流的現象が卓越するような場合には、Partheniades^{4,5)}、岸ら⁶⁾、馬場ら⁷⁾、村岡¹⁴⁾ の実験結果より、

$$\varphi \propto \theta^6 \quad (9)$$

となるものと考えられる。一方、せん断流が強く、密度流的現象が卓越するような場合には、Moor・Long¹⁸⁾、Kato・Phillips¹⁹⁾、Wu²⁰⁾ および浅枝・玉井²¹⁾ の実験結果から、

$$\varphi \propto \frac{\rho_s}{\sigma_s - \rho_w} \left(\frac{2}{C_f} \right)^{7/2} \frac{\theta^3}{R_{e\delta} \sigma_*}$$

となる。 $\rho_s/(\sigma_s - \rho_w)$ 、 $(2/C_f)^{7/2}$ 、 $R_{e\delta}$ 、 τ_* の各無次元量が θ^3 の変動値に比較して小であることから、

$$\varphi \propto \theta^3 \quad (10)$$

と表わすことができる。

いま、 φ と θ についての実験結果を Fig.2 に示す。図中のデータは著者らがベントナイト泥について行なった実験結果で、データに合うように θ の冪数を定めると、4.0 になる。ここで、底泥の粘性が小さくなるほど、ガリレオ数は大きくなり、底泥の移動を容易にする。これに流速の増加がくわわると、底泥の粘性効果が薄れていることから、(9)

式に従うような掃流的現象が現われるものと考えられる。一方、粘性が大である場合には、ガリレオ数小さく、底泥粒子の移動は困難となり、(10)式に示すような、流れからのエネルギー吸収による内部波の発生を見るようになるものと考えられる。いま、クーリガン数 0.5 を境にして、それより大な領域で掃流現象の(9)式の関係が、また、以下では密度流的現象の(10)式の関係が卓越するとして、Fig.2 の実験結果を用いると、(6)

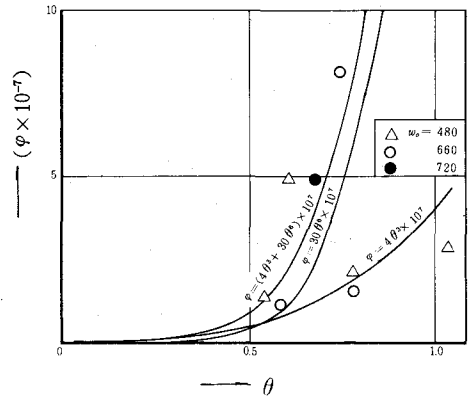


Fig. 2 Relation between φ and Keulegan number.

ではFig.2 から明らかなように、底泥層の粘度が小であるのにもまして、流速が遅く、層表面は安定していることが多く見られる。したがって、底泥の巻き上がり現象は底泥層と流水層との中間に位置する中間層（縦縞が見られる層）を介して行なわれるものと考えられる。(12)式は、さらに、底泥と砂粒子との統一性の考慮および底泥の取扱を粒子状体とした大坪らの領域に対応すると考えられる。一方、底泥の含水比の高低にもまして、流速が増加するに従い、泥粒子は移動し易くなり、その結果として、底泥の巻き上がりは急激に増大し、(13)式に示すような無次元せん断力の4乗の勾配を作り出しているものと考えられる。

底泥の巻き上がり量はFig.4からも明らかなように、無次元せん断力のみで定まるのではなく、そのデータは幅広く分散しているのが認められる。

Fig.4の実線の切片値（状態係数、 ϵ ）を構成する粘度、粒径等の物理量について調べることとする。データは大坪らのベントナイト泥、カオリナイト泥および霞ヶ浦泥の値に基づいている。底泥粘度の変化範囲が比較的大であること、無次元せん断力の関係物理量に含まれていないこと等から状態係数と底泥の粘度を両軸にとり、実験値を整理したのがFig.5である。図より、状態係数 ϵ は粘度の-2乗の勾配を持つような関数（例えばガリレオ数）から成っていることがわかる。そこでいま、ガリレオ数および(11)'式から求めた ϵ 値とFig.4から求まる状態係数 ϵ との関係を整理し、Fig.6,7のそれぞれに示す。これらの図から、状態係数 ϵ がガリレオ数、底泥の相対粘度および粒子の相対比重からなる $(\sigma_s/\rho_w - 1)^3 G / (\rho_s/\rho_w - 1)^2$ の傾向を良く表わしているのが認められる。また、(6)式の φ の関数形が流速あるいは底泥の粘性によって、すなわち、クーリガン数によって定まるとすると、ベントナイト泥を用いた著者らの実験結果より、Fig.2あるいは(11)式のように書き表わされる。掃流的現象に対しては $\varphi = 30\theta^3 \times 10^7$ 、密度流的現象に対しては $\varphi = 4\theta^3 \times 10^7$ である。これらの現象が底泥層表面の状態に寄与する程度は限界クーリガン数を境にして反転すると考えられ、0.4～0.5付近に限界値の存在することが実験より予想される。

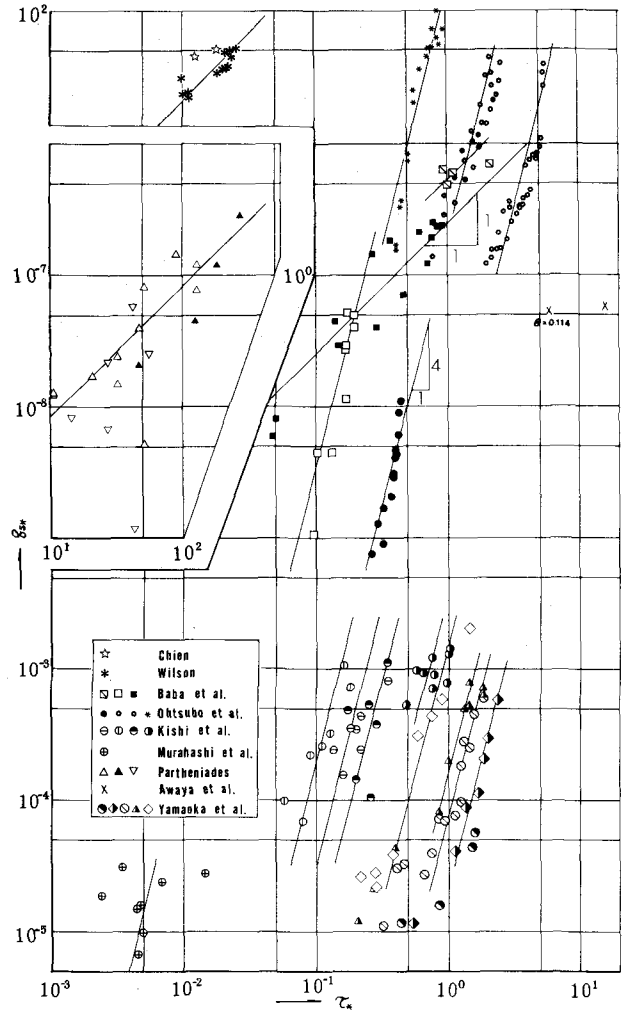


Fig. 4 Nondimensional rolling-up rate in water flow

式は

$$\frac{q_{s*}}{\tau_*} = \frac{(\sigma_s/\rho_w - 1)^3}{(\rho_s/\rho_w - 1)^2} G \tau_*^3 \{ 4 \theta^3 + 30 \theta^6 \} \times 10^7 \quad (11)$$

$$= \xi \tau_*^3, \quad (\xi = \frac{(\sigma_s/\rho_w - 1)^3}{(\rho_s/\rho_w - 1)^2} G \{ 4 \theta^3 + 30 \theta^6 \} \times 10^7) \quad (11')$$

と書くことができる。ここで、掃流的現象あるいは密度流的現象が支配するような場合には、(11)式はそれぞれ

$$\frac{q_{s*}}{\tau_*} = \frac{C_f}{2} \times (30 \times 10^7) \quad ; \text{掃流的現象} \quad (12)$$

$$\frac{q_{s*}}{\tau_*} = \frac{(\sigma_s/\rho_w - 1)^3}{(\rho_s/\rho_w - 1)^2} G \theta^3 \cdot \tau_*^3 \times (4 \times 10^7) \quad ; \text{密度流的現象} \quad (13)$$

5. 考 察

河川等における底泥の巻き上がり現象は水流と底泥の状態によって、掃流的現象あるいは密度流的現象のいずれかを示す。特に、底泥が粘性を持つ点が流砂現象と異なり、また、底泥粒子群による高含水比泥層の形成が海水・淡水(液-液)密度流現象と異なる部分で、この現象を複雑にしている大きな原因であると考えられる。

泥層が粘性を持つことによって、底泥層に対する応力の時間依存性と応力-ひずみ速度の非線形性が顕著に現われるようになる。その結果、Fig. 3に見られるような応力のヒステリシス・ループを描く。このループ面積の大小は泥層の摩擦損失エネルギーの量を表わし、含水比の増加に伴って、それは減少する。また、応力-ひずみ速度の非線形関係は、泥層が構造破壊を進行させ、より小単位の構造形を形成するようになるためと考えられる。したがって、河川、湖沼等底泥における応力-ひずみ速度曲線の急変点¹³⁾は粒子間構造の急激な破壊を意味するものと考えられる。

次に、流れを伴う時の底泥の挙動を調べることとする。底泥の巻き上がり量を種々の流れのせん断力に対して示したのがFig. 4である。ここで、図に用いたデータはナイロンおよびポリスチレン球粒子を除いてすべて粘性土に対するもので、実験条件はTable 3に示す通りである。図より、底泥の巻き上がり量は2つの傾向を示している。その一つに鶴見川泥、サンフランシスコ湾泥、ナイロン球粒子¹⁶⁾、ポリスチレン粒子¹⁶⁾に見られるような1乗の勾配を持つもの、他のグループとして、ベントナイト泥、カオリン泥、霞ヶ浦泥、箱崎泥、幾春別川泥^{6,17)}、多摩川泥に見られるような4乗の勾配を持つものである。ここで、ナイロン球粒子およびポリスチレン粒子は粘性がないことから、非粘性の砂粒子に対する実験に相当するものと考えられる。また、この1乗の勾配は(12)式と一致するもので、岸ら、馬場ら、Partheniadesおよび村岡の結論とも一致している。また、このような状態

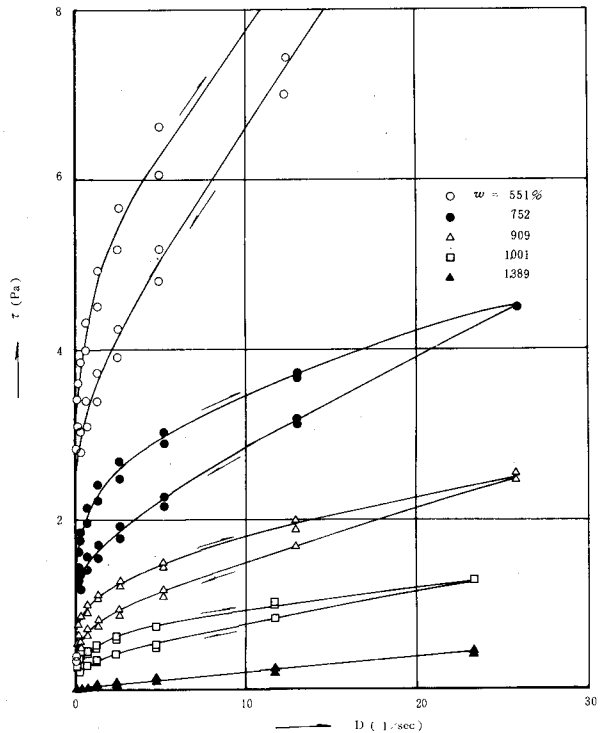


Fig. 3 Measurement of hysteresis curve on shear stress and shear rate (Bentonite mud).

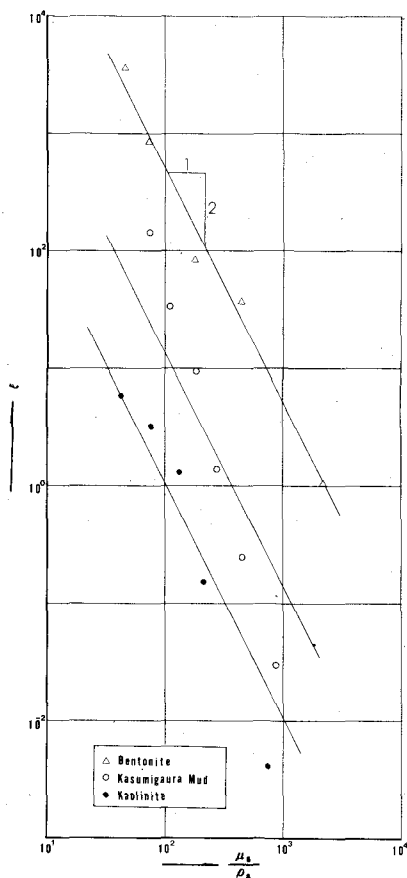


Fig. 5 Relation between coefficient of condition and kinematic viscosity.

(3) 掃流的な現象が生じている時の巻き上がりは、底泥層表面に形成された縦縞がその表面をなめるように左右に揺れ動きながら流下しその過程で生じる。また、底泥層と縦縞を形成している層とは必ずしも連続的につながっているものではないようである。一方、密度流的な現象では重力内波が底泥層表面に生じるようになり、波のクレストからはスパイラル渦が発生する。不安定さがさらに増すと碎波となり、底泥は急激に流れの中に運ばれて行く。

河川・湖沼等における底泥の巻き上がり現象には掃流的現象と密度流的現象の2現象が同時に含まれていると考えられる。そして、流れの状態と底泥の流動特性の種々の組合せによって、2現象のいずれかが泥層表面に現象として現われるものと考えられる。したがって、いずれの現象に対しても常に泥粒子の存在、そして、それによる粘性が生じることとなる。しかしながら、底泥の巻き上がり現象の双方の究極として、流砂現象と密度流現象とが位置することもまた否定できないところである。そのようなことから、究極の2現象への拡張（接続）性について、今後、検討を加えていきたいと考えている。また、図5, 6, 7に認められるような底泥材料の相異によるデータのばらつきは底泥の限界掃流力を無視したデータ処理に帰因しているものと考えられる。

終わりに、本研究を行なうに当り、貴重な御助言を戴いた千葉工業大学石井吉一教授に感謝の意を表します。

6. あとがき

粘性を有する底泥の巻き上がり現象について、その現象を支配している重要な物理量の抽出を次元解析の手法で試みた。また、近年明らかにされた密度流的現象の生成因子を抽出された物理量から明らかにし、掃流的現象との関係について考察を行なった。その結果次のような事柄が明らかとなった。

(1) 底泥の巻き上がり現象を律する主な因子はガリレオ数、底泥の密度および比重からつくられる状態係数であることを明らかにした。底泥の粘性が小さく、状態係数に含まれているガリレオ数あるいはクーリガン数が不安定値になると底泥表面には内部波が発生し易くなり、密度流的な現象が見られるようになる。一方、粘性が大あるいは流速が小であると、底泥表面は安定になり、縦縞を伴う掃流的な現象が現われるようになる。

(2) 底泥の巻き上がり量は底泥層の粘度および密度が小であるにもまして、流速が小の場合は層表面は安定であり、無次元せん断力の1乗に比例する傾向をもつ。また、粘度および密度が小さくなると、クーリガン数もまた非常に小さくなることから、層表面は不安定となり、その時の底泥の巻き上がり量は無次元せん断力の4乗に比例するようになる。

7. 引用文献

- 1) 中田邦夫；ヘドロ，土と基礎，第8巻9号，1975.
- 2) 栗谷陽一郎，楠田哲也，田中慎一郎；活性汚泥の巻き上げ機構に関する基礎的研究，第30回年講集Ⅱ，土木学会，1975.
- 3) 大坪国順，村岡浩爾，高野恒雄；粘性土の限界掃流力について，第16回衛生工学研究討論会講演論文集，土木学会，1980.
- 4) Partheniades, E.; Erosion and Deposition of Cohesive Soils, Proc. of Hydraulics Div., ASCE, No. HY1, 1965.
- 5) Partheniades, E.; Erosion and Deposition of Cohesive Materials, River Mechanics, (Edited by Shen, H.W.) Vol. II, Chap. 25, McGraw-Hill.
- 6) 岸力，山口忠男，武内達夫；流れによる粘性土の洗掘破壊と水路の限界流速，第22回年講集Ⅱ，土木学会，1967.
- 7) 馬場洋二，佐々木重義，伊藤雄二；ヘドロ河床の流れによる洗掘特性，土木技術資料，Vol. 16, No. 10, 1974.
- 8) 細井由彦，住友恒，岩井重久；底泥の巻き上げに関する実験的研究Ⅱ，第15回衛生工学研究討論会講演論文集，土木学会，1979.
- 9) 楠田哲也，海田輝之；底泥の巻き上げと沈降，国立公害研究所調査報告，第16号，1980.
- 10) 楠田哲也，海田輝之，栗谷陽一，石原達弘；底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究(Ⅱ)，第18回衛生工学研究討論会論文集，土木学会，1982.
- 11) 海田輝之，楠田哲也，栗谷陽一，則松秀晴；底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究，第17回衛生工学研究討論会論文集，土木学会，1981.
- 12) 大坪国順，村岡浩爾，高野恒雄；底泥の限界掃流力と巻き上げ量について，国立公害研究所調査報告，第16号，1981.
- 13) 大坪国順；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，1983.
- 14) 村岡浩爾；流れによる底泥浮上と水質との関連，第18回水理講演会論文集，土木学会，1974.
- 15) Yalin, M. S.; Mechanics of Sediment Transport.. Chap. 5 in Sediment Transport Rate, 2nd edition, Pergamon Press.
- 16) Wilson, K. C.; Bed-load Transport at High Shear Stress.. Proc. ASCE., Vol. 92, No. HY6, 1966.
- 17) 村端克巳，大石功，小川芳昭；粘性土の洗掘機構について，北海道開発局土木試験所月報，第176号，1968.
- 18) Moore, D. W. and Long, R. R.; An Experimental Investigation of Turbulent Stratified Shearing Flow, J. Fluid Mech., Vol. 49, Part 4, 1971.
- 19) Kato, H. and Phillips, O. M.; On the Penetration of a Turbulent Layer into Stratified Fluid, J. Fluid Mech., Vol. 37, Part 4, 1969.
- 20) Wu, J.; Mixed Region Collapse with Internal Wave Generation in a Density-Stratified Medium, J. Fluid Mech., Vol. 35, Part 3, 1969.
- 21) 浅枝隆，玉井信行；成層流界面における混合の特性について，第23回水理講演会論文集，土木学会，1979.

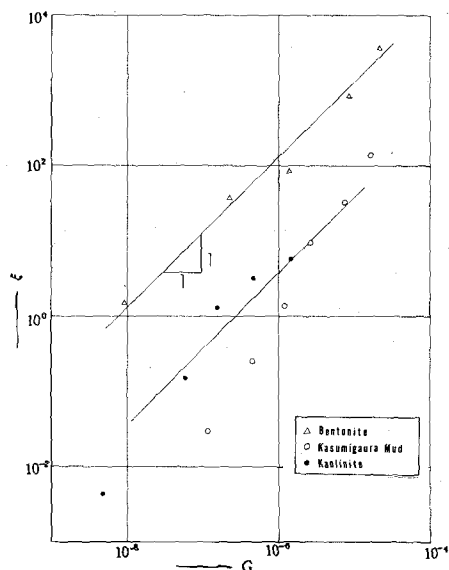


Fig. 6 Relation between coefficient of condition and Galileo number.

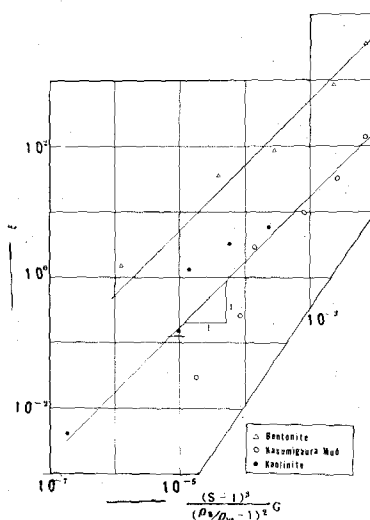


Fig. 7 Comparison between experiment and calculation value on the coefficient of condition.

Table 3 Summary of conditions on experiments

Source of data	Symbol	Material	d_s (mm)	σ_s/ρ_w	ρ_s (g/cm ³)	w_s (%)	η (poise)	Note
Chien, N.	☆	Polystyrene	$4.75 \times 3.18 \times 2.38$	1.052	—	—	—	
Wilson, K. C.	*	Nylon	3.88	1.138	—	—	—	
Baba, Y. et al.	■	Tsurumi R. Mud (A)	0.0924	2.52	—	—	—	
"	▣	" (B)	0.0924	2.52	—	—	—	
"	□	Tama R. Mud (2)	0.3472	2.70	—	—	—	
Ohtsubo, K. et al.	●	Kasumigaura Mud (1)	0.0207	2.42	1.071	790	0.35	
"	⊙	Kasumigaura Mud	0.0207	2.42	1.136	390	10.0	
"	○	"	0.0207	2.42	1.109	496	3.0	
"	*	"	0.0207	2.42	1.082	675	0.8	
"	△	Bentonite Mud	0.0164	2.48	1.174~ 1.101	303~ 550	150~ 0.5	Only Fig.5.6.7
"	●	Kaolinite Mud	0.0065	2.60	1.327~ 1.158	150~ 350	10.0~ 0.5	
"	○	Kasumigaura Mud	0.0207	2.42	1.136~ 1.082	390~ 675	10.0~ 0.8	
Kishi, C. et al.	⊖	2 : 1 (clay:silt)	0.0034	2.64	1.685	52.8	—	
"	⊗	3 : 1 (")	0.0025	2.63	1.671	54.4	—	
"	⊕	1 : 1 (")	0.0061	2.65	1.690	52.5	—	
"	⊙	1 : 0 (")	0.0010	2.59	1.649	56.0	—	
Murahashi, K. et al.	⊕	Ikushunbeisu R. Mud	0.0444	2.67	1.749~ 1.692	46.0~ 52.96	—	
Partheniades, E.	△	San Francisco Bay Mud I	0.00092	2.16	—	—	—	
"	▲	" II	0.00092	2.16	—	—	—	
"	▽	" III	0.00092	2.16	—	—	—	
Awaya, Y.	×	Hakozaki Mud	0.001 (= d_{50})	2.73	1.387	127	—	