

粘性を有する河川底泥の巻き上がり現象

千葉工業大学 正員 ○滝 和夫

千葉工業大学 " 岡 正義

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、底泥に吸着している重金属や塩類の放出による水質汚濁や富栄養化、底泥が浮遊物質となるために生じる水質汚濁、底泥そのものの浚渫問題等の解決に重要な意味を持っている。

この巻き上がり現象が河床付近の流れの状態と密接に関係していることは容易に予想されるところである。一方、底泥層については、凝集性のある微粒子が主成分をなし、微生物、その死がい等の有機物を含んでいることが多いため、その性質は極めて複雑となっている。したがって、底泥の流送現象（巻き上がり現象も含めて）は砂等の非凝集性粒子の流砂現象とは異なり、一層難しい問題となっている。近年、底泥層の表面付近の流れが底泥粒子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み立てての議論がなされることが多い。しかしながら、計測に困難さを伴うなど、その妥当性の評価は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という方法がとられているのがほとんどのようである。したがって、モデル化・評価の基本としての現象を律する要因について、そのメカニズムを系統的に十分把握する必要がある。

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、この種の現象が含まれている掃流現象と密度流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

河川等の底泥は粘性を持っていると同時に、含水比の高いのが特徴的である。これに加えて、流れの状態によって、底泥表面が写真1のように変化することが近年良く知られるようになってきた。ここで、写真1は水路中央部に設けたくぼみ（長さ150cm、幅30cm、深さ7cm）にベントナイト泥を敷きならし、底泥層の表面の状態をとったものである。この時の水流のレイノルズ数は10,600、水深6.5cm、底泥の含水比は1.100%から350%までの5段階に変化させてある。これらの写真より、含水比が低い場合には、底泥層表面は流下方向に筋状の縦縞を生じ、この縦縞が底泥層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、流れに巻き上げられている。また、底泥層と縦縞を形成している層とは必ずしも一体化しているものではないようである。一方、含水比が高くなると、底泥層の表面は不安定となり、波状を呈し、内部波の生じているのがわかる。このような状態では、もはや縦縞はなく、海岸の砕波のような、あるいは、波のクレストから、糸つむぎのような形で底泥が流れの中に運ばれて行くのが観察される。この内部波的特性の存在はフロック泥を用いた栗谷ら¹⁾および霞が浦泥を用いた大坪ら^{2,3)}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生じるような掃流現象と内部波を伴う密度流現象との二つが共存し、どちらかの強い一方が現象を支配し、底泥層表面に種々の形状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とせん断応力との関係は多くの研究者によって調べられている。その中で、岸ら⁴⁾は底泥の巻き上がり量が $0.1\text{ g/cm}^2\cdot\text{hr}$ を境にして $q_s \propto \tau^2$ 、($q_s > 0.1$ 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。また一方、馬場ら⁵⁾は単位幅当りの容積巻き上がり量を q'_s として $q'_s = 2.10 \tau_*^{1.25}$ 、($q'_s \equiv q_s / u_* ds$) の関係を示している。しかし、馬場らの多摩川泥(2)のデータだけは上式と異なった傾向が認められる。粘性がなく、比重が1.138であるナイロン球を用いたK・C・Wilsonの結果⁶⁾から、巻き上がり量はせん断力の1乗に比例することが認められている。

3. 解析

河川底泥の巻き上がり現象に関する諸物理量を図1に示すような密度 ρ 、粘度 μ 、流速 u 、摩擦速度 u_* 、水深 h 、底泥の粒子径 d_s 、および巻き上がり量 q_s 、とすると、これらの関係式として、

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

ここで、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、

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

をえる。ここで、

$$q_{s*} = \frac{q_s}{\rho_w (S-1) u_*}, \quad \theta = \left\{ \frac{\nu_s (\rho_s/\rho_w-1) g}{u_w} \right\}^{1/3},$$

$$R_{ew} = \frac{u_w h}{\nu_w}, \quad F_i = \frac{u_w}{\{(\rho_s/\rho_w-1) g h\}^{1/2}},$$

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{(S-1) g d_b}, \quad G = \frac{g d_b^3}{\nu_s^2}$$

(3)

S : 底泥粒子の比重、 ν_s : 底泥層の動粘性係数、 w_o : 底泥層の含水比(%)である。底泥の巻き上がりが生じる範囲での流速、粒径、粘度等の値を(2)式右辺の各項に代した結果、各無次元項のオーダーは表1のようになる。表より、 $\{(S-1)^3/(\rho_s/\rho_w-1)^2\} G \tau_*^3$ の項が他と比較して変動範囲の大きいのがわかる。いま、この項で展開し、整理すると、次式のようになる。

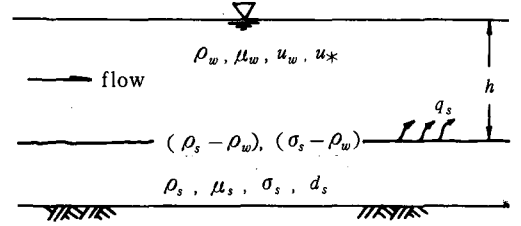


図1 底泥の巻き上がりに関する諸物理量

表1 各無次元項の幂数

無次元項	幂数	無次元項	幂数
$\frac{q_{s*}}{\tau_*}$	-11~7	$\frac{s(w_o+100)}{100+w_o}$	0
θ^3	-3~6	$1/\tau_*$	-2~4
μ_s/μ_w	3~6	$(s-1)$	0
R_{ew}	3~6	$1/F_i^2$	-1~5
$\frac{(S-1)^3}{(\rho_s/\rho_w-1)^2} G \tau_*^3$	-12~-1	σ_s/ρ_w	0

$$\begin{aligned} \frac{q_{s*}}{\tau_*} = \phi_0 \left\{ \frac{(S-1)^3}{(\rho_s/\rho_w-1)^2} G \tau_*^3 + \theta^3 \phi_1 + \frac{\sigma_s}{\rho_w} \phi_2 + \frac{\mu_s}{\mu_w} \phi_3 + R_{ew} \phi_4 + \frac{S(100+w_o)}{100+S w_o} \phi_5 + \frac{1}{\tau_*} \phi_6 \right. \\ \left. + (S-1) \phi_7 + \frac{1}{F_i^2} \phi_8 \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

いま、関数 ϕ が $\{(S-1)^3/(\rho_s/\rho_w-1)^2\} G \tau_*^3$ の幂乗で表現できるものとすれば、

$$\begin{aligned} \frac{q_{s*}}{\tau_*} = \frac{(S-1)^3}{(\rho_s/\rho_w-1)^2} G \tau_*^3 \left\{ 1 + \theta^3 \phi_1 + \frac{\sigma_s}{\rho_w} \phi_2 + \frac{\mu_s}{\mu_w} \phi_3 + R_{ew} \phi_4 + \frac{S(100+w_o)}{100+S w_o} \phi_5 + \frac{1}{\tau_*} \phi_6 \right. \\ \left. + (S-1) \phi_7 + \frac{1}{F_i^2} \phi_8 \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、(5)式の右辺 $\{$ 内第2項以後の無次元項の変動幅が小であることから、定数とすると、

$$\frac{q_{s*}}{\tau_*} = \xi \tau_*^3, \quad (\text{ここで } \xi \equiv \alpha \frac{(S-1)^3}{(\rho_s/\rho_w-1)^2} G)$$

上式より、底泥の巻き上がり量 q_{s*} はせん断力 τ_* の4乗とガリレオ数 G の積として表わされることがわかる。

このガリレオ数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、無次元せん断力および摩擦速度係数の関数として表わすこともできる。したがって、ガリレオ数は底泥表面の内部波発生の有無を知るパラメータであるとも考えられる。また、係数 ξ は流れの状態を表す物理量が互に打消され、底泥層、泥粒子および河川水の性質のみに関係する値であるのが特徴的で、Yalinのパラメータ $E^{(7)}$ と同様なものである。この係数 ξ は、底泥層の粘度および密度に反比例していることから、底泥層の粘度等の減少は巻き上がり量の急激な増大を引き起こすことになる。

いま、流れの程度にかかわらず底泥層の粘度および密度が一定であるような場合、すなわち、ガリレオ数が任意の一定な値を保つとき、底泥の巻き上がり量は底泥の粘度の2乗に反比例し、無次元せん断力の4乗に比例すると考えられる。

一方、底泥層の粘度および密度が流れの状態によって変化するような場合には、(6)式は

$$\frac{q_{s*}}{\tau_*} = \alpha \left\{ \frac{u_*^2}{(\rho_s/\rho_w - 1) g \nu_s} \right\}^2 \tag{7}$$

と書き直すことができる。(7)式より、底泥の巻き上がり量は無次元せん断力の1乗に比例するようになることがわかる。ここで、底泥の粘度 μ_s を粒子相互の粘着力と粒子の形状に帰因するようなインターロッキング力との和として書くことができるとすると、

$$\mu_s = \mu_o + \mu_i \tag{8}$$

(ここに、 μ_o :粒子相互の粘着力による粘度、 μ_i :インターロッキング力による見掛の粘度)
(7)式が成立するような時には、流れの速度の増大と共に μ_i の増加が、また、写真1-(b)に見られるような流水層と底泥層の境に形成された中間層における μ_o の増大が予想される。この中間層は流砂現象での流動層に対応し、上下層間の粘度および密度のバランスを保っているものと考えられる。

以上、底泥層の粘度および密度が流れの状態によって変化するか否かで、その巻き上がり量は無次元せん断力の冪乗数が1あるいは4に変化することになる。また、底泥層の粘度および密度が十分に小さく、 $\theta <$

表2 実験の諸条件

Source of data	Material	d (mm)	S	ρ_s (g/cc)	ν_s (cm ² /sec)	μ_s (poise)	Note
Chien, N.	Polystyrene	$4.75 \times 118 \times 2.58$	1.92	—	—	—	
Wilson, K. C.	Nylon	3.89	1.138	—	—	—	
Haba, Y. etc.	Tsurumi R. Mud (A)	0.024	2.52	—	—	—	
"	" (B)	0.024	2.52	—	—	—	
"	Tama R. Mud (2)	0.0472	2.75	—	—	—	
Okamoto, K. etc.	Kanagawa Mud (1)	0.0297	2.42	1.071	740	0.35	
"	Kanagawa Mud	0.0297	2.42	1.136	260	10.0	
"	"	0.0297	2.42	1.100	696	3.0	
"	"	0.0297	2.42	1.082	875	0.8	
"	Benicue Mud	0.0184	2.48	$1.134 \sim 1.161$	$305 \sim 350$	$156 \sim 19.0$	Only Fig. 4
"	Kanagawa Mud	0.0201	2.42	$1.136 \sim 1.082$	$395 \sim 675$	$10.9 \sim 0.8$	
Kubo, C. etc.	2:1 (clay-rich)	0.024	2.64	1.685	52.8	—	
"	3:1 (")	0.025	2.63	1.671	54.4	—	
"	1:1 (")	0.041	2.85	1.690	52.5	—	
"	1:0 (")	0.010	2.79	1.649	56.0	—	
Murahashi, K. etc.	Drachenhofen R. Mud	0.0444	2.67	$1.740 \sim 1.692$	$46.6 \sim 52.96$	—	
Partheniades, E.	San Francisco Bay Mud I	0.0092	2.18	—	—	—	
"	" B	0.0092	2.18	—	—	—	
"	"	0.0092	2.16	—	—	—	
Awaya, Y.	Higashi R. Mud	$0.001 \sim 4.43$	2.73	1.387	127	—	

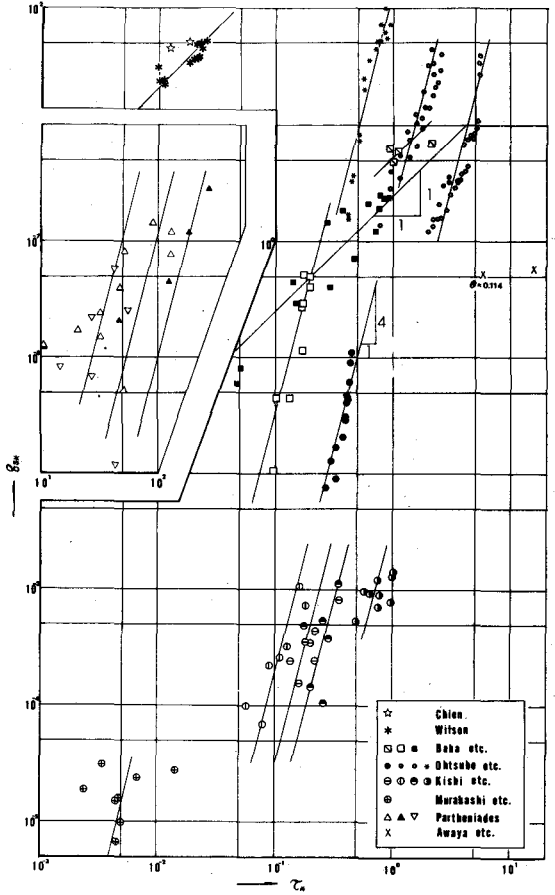


図2 無次元巻き上がり量と無次元せん断力の関係

0.127 ($R_{sw} \leq 450$)で、または、 $\theta < 0.178$ ($R_{sw} > 450$)の範囲のとき底泥表面は不安定となり、内部波が発生するようになる。一方、内部波の生じない程にクーリガン数が大になると、底泥層表面の見掛の粘性が増すか、または、中間層が形成されるようになると思われる。

4. 考 察

底泥の巻き上がり量を種々の流れのせん断応力に対して示したのが図2である。ここで、各データに対する実験条件は表2に示すとうりである。図より、巻き上がり量は2つの傾向を持っていることがわかる。その一つとして、ナイロン球粒子、ポリスチレン粒子、鶴見川泥に見られるような緩やかな勾配を持つもの。その他として、ベントナイト泥、カオリン泥、霞ヶ浦泥、多摩川泥、箱崎泥、幾春別川泥およびサンフランシスコ湾泥に見られるような急勾配を持つものとに分かれる。

ナイロン球で代表される泥の結果は(7)式で示される1乗の直線に一致しているのが認められる。岸らおよび馬場らの結果とも同程度の値である。このような状態では、底泥層の粘度は大きく、層表面は安定していることが多く、中間層の形成・発達を促進するようになると思われる。その結果、中間層内の粘度および密度の増加、あるいは、底泥層内のインターロッキングによる見掛の粘度の増大となり、写真1-(b)のような状態を示すものと考えられる。ここで、写真1-(a)は底泥の粘度が高く、流れが限界せん断力以下の場合のものである。

一方、底泥の含水比が高く、粒子相互の間隔が大になるに従い粘度の減少が生じ、底泥層表面は不安定となって、写真1-(C)、(D)のような内部波が生じるようになる。写真1-(C)には、縦縞がまだ残っているのが見られる。このような時の巻き上がり量は、図2の4乗の曲線で表わされるようになり、そして、巻き上がりの現象は波のくだけ等によっているものと考えられる。

底泥の巻き上がり量は個々の粒径、粘度等の違いによって、図2から明かなように、データの幅広い分布を生じているのが認められる。この分布の幅は無次元せん断力以外のものに基づいていると考えられることから、いま、図2の実線の係数

(状態係数、 ξ)を構成する粘度等の物理量について調べる

こととする。データは大坪ら⁸⁾のベントナイト泥、カオリン泥および霞ヶ浦泥の値に基づいている。底泥の粘度の変化する範囲は比較的大であること、および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図3である。また、図2の実験値から求めた状態係数の値と、(6)式の係数との関係を示したのが図4である。図3より、状態係数が底泥の動粘性係数の2乗に反比例していることから、ガリレオ数が係数の関数になりえると考えられる。また、ガリレオ数、底泥層の相対密度および粒子の相対比重からなる(6)式の状態係数が実験値と良く一致しているのが図4から知ることができる。ここで、ベントナイト泥の値が他に比較して大きくシフトしていること、および、データの傾向は一致しているが、(6)式の係数値と図2から求められる係数値に大きなへだたりが認められる。このことは、(5)式の{ }内の各項を定数 α と置いたことによると考えられる。

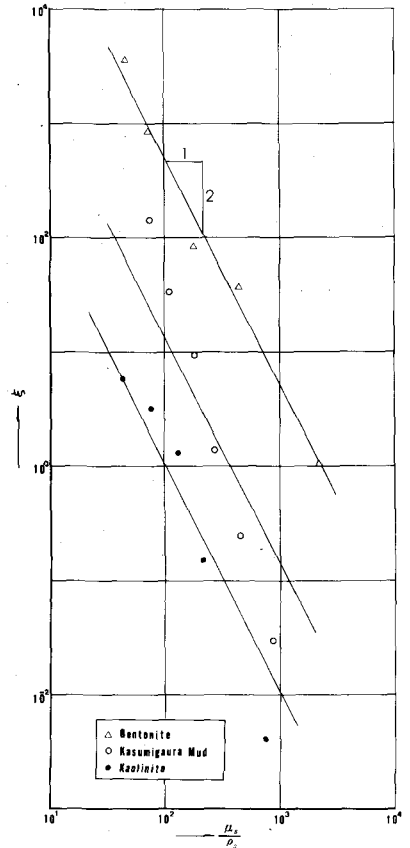


図3 状態係数と底泥の動粘性係数

以上の結果から、状態係数 ξ はガリレオ数を含む(6)式および(7)式で示すことができると考えられる。ここで、状態係数 ξ の中の α 値は底泥の種類によって変化すると考えられる。

5. 結 論

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、底泥の密度と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、密度流的な現象が見られるようになる。また、粘性が大であると底泥表面は安定となり、縦縞が生じ、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流れの状態によって変化する場合は無次元せん断力の1乗に比例し、変化しない場合には無

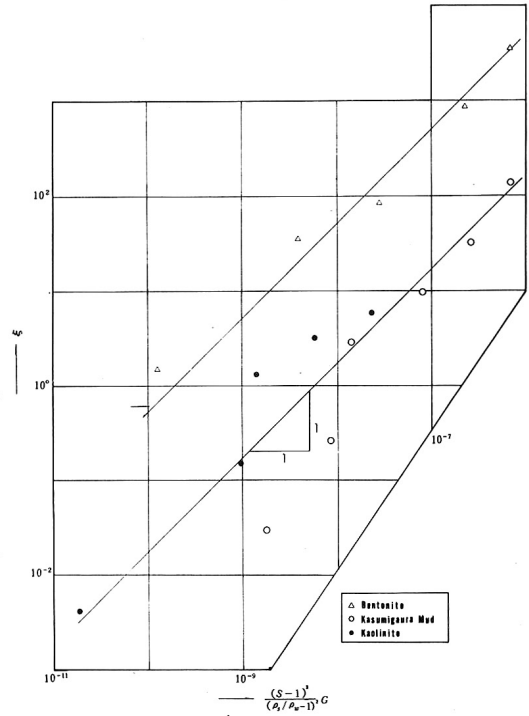


図 4 状態係数についての実験値と計算値の比較

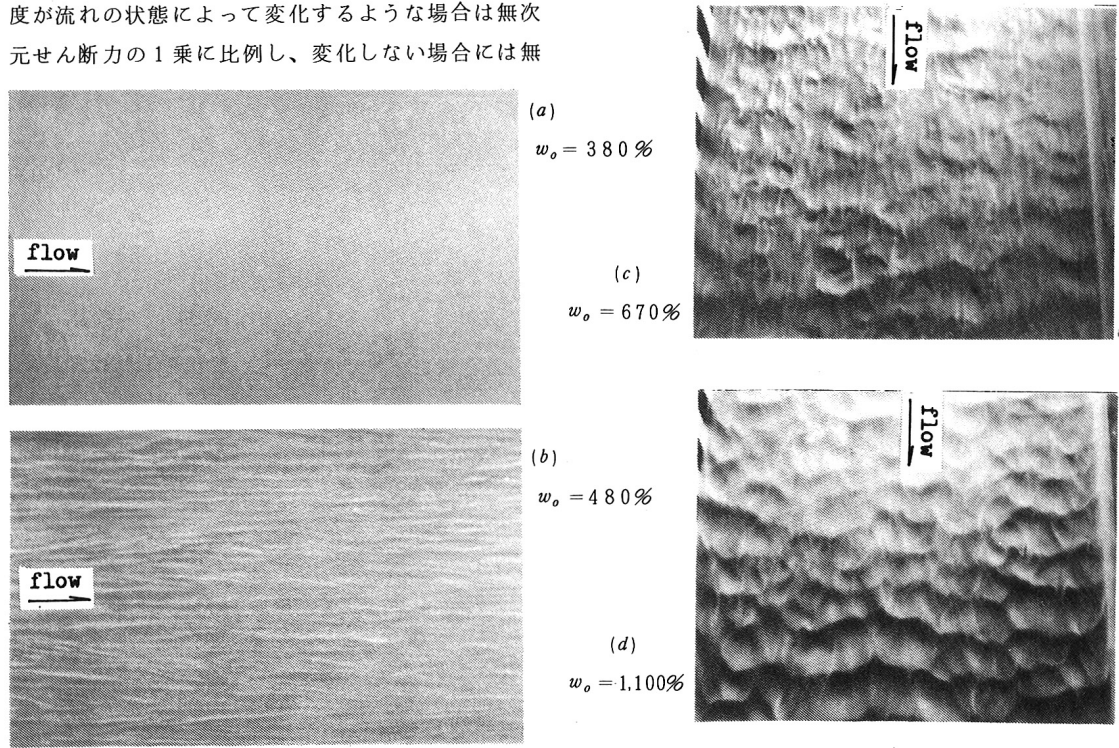


写真1 底泥層表面の状態

次元せん断力の4乗に比例すると考えられる。

(3) 掃流的な現象が生じている時の底泥の巻き上がりは、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、密度流的な現象が生じている時には、碎波のような、あるいは波のクレストから糸つむぎのような形で底泥が流れの中に運ばれて行く。

6. 引用文献

- 1) 粟谷陽一郎、楠田哲也、田中慎一郎：汚性汚泥の巻き上げ機構に関する基礎的研究、土木学会第30回年講集Ⅱ、土木学会、1975.
- 2) 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.
- 3) 大坪国順、相崎守弘、福島武彦：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.
- 4) 岸 力、山口忠男、武内達夫：流れによる粘性土の洗堀破壊と水路の限界流速、土木学会第22回年講集Ⅱ、土木学会、1967.
- 5) 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堀特性、土木技術資料、Vol.16, No.10, 1974.
- 6) Wilson, K.C.: Bed-load Transport at High Shear Stress. Proc. ASCE. Vol.92, No. HY6, 1966
- 7) Yalin, M.S.: Mechanics of Sediment Transport. Chap.5 in Sediment Transport Rate, 2nd edition, Pergamon Press.
- 8) 大坪国順、村岡浩爾：底泥の飛出し量に関する研究、第26回水理講演会論文集、土木学会、1982.
- 9) Raudkivi, A.J.: Loose Boundary Hydraulics, Chap.7 in Suspended Sediment, 2nd edition, Pergamon Press.
- 10) Partheniades, E.: Erosion and Deposition of Cohesive Soils, Proc. of Hydraulics Div., ASCE., No. HY1, 1965.
- 11) Partheniades, E.: Erosion and Deposition of Cohesive Materials, River Mechanics Vol. II (Edited by Shen, H. W.), Chap.25, McGraw-Hill.
- 12) 村端克己、大石功、小川芳昭：粘性土の洗堀機構について、北海道開発局土木試験所月報、第176号、1968.