

(5) 底泥の巻き上げに関する実験的研究(II)

京都大学工学部

"

"

○細井 由彦

住友 恒

岩井 重久

1. はじめに

水中に堆積した汚泥は、洪水等外部からの力によって再びまきあがり水域を汚染する原因となる。これら底泥のまきあげに関する研究は多く行なわれているが、いまだ明確な定量化を行なうまでには到っていない。これは汚泥が微粒子であり、砂のように単一粒子に作用する力のつりあいから運動を論ずるには無理があるだけでなく、粘着性や凝集性をもっており、さらにその性状が汚泥によって異なっているために、一般的に取り扱うことが困難であるためであると考えられる。

筆者らはすでに、泥のまきあげに関する実験を行ない、泥のまきあげは、その泥の堆積時間に大きく支配されること、まきあげに関しては密度流としての取り扱いが有効なことなどを報告した⁽¹⁾。

本研究では底泥物質として四種類の資料を用いて実験を行ない、底泥の堆積状態を示す指標として粘度とみかけの密度を測定し、これらの量を用いて、異なった組成をもつ泥のまきあげを一般的に取り扱うことを試みた。

2. 実験方法

底泥として用いた資料を表-1に示す。各泥を図-1に示すようなビーカー中に沈め堆積時間を変化させて実験を行なった。水深は10.7cm、泥の厚さは約1cmとし、水面下0.3cmのところに、6cm×1.7cmの羽根をとりつけ、これを回転させることによって流速を与え、目視によって汚泥の浮上限界を求めた。汚泥は回転方向の流れよりもむしろ中心に向かう二次流の作用によってまきあがることが観察された。これら二次流の運動までも考慮して理論的に論ずるのは複雑になるので、あらかじめ粒径のわかった砂を底にしきつめ、砂に限界掃流力を与える回転数を求め、岩垣の式⁽²⁾を用いて羽根の回転数と底面せん断応力の関係を求めた。その結果を図-2に示す。

各泥について種々の含水率における粘度を、単一円筒回転式粘度計を用いて測定した。これは直径92mm、高さ76mmのカップ中に泥を入れ、試料中で円筒を一定速度で回転させたときのトルクを測定するものである。円筒の回転数は62.5rpm、円筒は直径45mm、高さ47mmのものと、直径61.2mm、高さ36mmのものの二種類を用いたが、泥は非ニュートン流体としての性質を示し両者の値に若干の相違が見られた。本研究では45φ×47のもの測定した値を粘度として採用した。その結果を図-3に示す。

沈降試験により底泥の平均密度 ρ_s の時間的変化を求めた結果が図-4である。各泥ともに沈降開始後1～3時間で一定値に達し、その後変化は見られなかった。粒度分布測定には光透過式粒度分布測定器を用いた。

		平均粒径 (μ)	密度 (g/cm^3)	強熱減量 (%)
泥-A	琵琶湖南湖 浜大津沖にて採取	17.7	2.03	15.3
泥-B	大津市柳ヶ崎浄水場 汚泥処理施設にて採取	18.0	1.85	67.5
泥-C	京都市北区原谷の 山地より採取	4.3	2.69	8.4
沈降性炭酸カルシウム		9.1	2.70	

表-1 実験に用いた泥

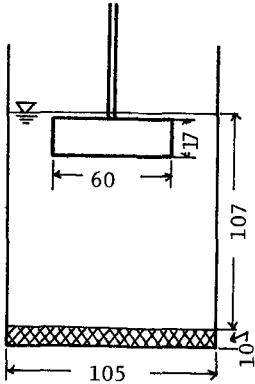


図-1 実験装置

3. 実験結果

まきあげの様子は泥の性状により異なっていた。

泥-A、泥-Bは写真-1-

1~4に示すように、底面

せん断応力 τ_0 の増加にと

もなって中央部がもりあが

りはじめ(写真1-1, 2),

成長してはげしく振動し

(写真1-3), やがて破壊

に到って(写真1-4) 図-2 回転数と

まきあげが始まった。底面せん断応力の関係

沈降性炭酸カルシウムではこのような様子は見られず,

τ_0 の増加にしたがい、断続的にすじをひいてはくように

あがり、やがて連続的にはくようにあがり始めた。(写真2-1~3)

泥-Cはこれらの中間的な様子を示した。部分的にもりあがって振

動するような現象は起こらなかったが、 τ_0 の増加により表面の一

部がうすくはがれ、そこからまきあげが始まった。

泥の堆積時間と限界掃流力との関係について得られた結果が、

図-5である。泥-A, Bでは限界掃流力は堆積時間が長くなるにつ

れて増加したが、泥-Cではわずかに増加しただけであり、沈降性炭

酸カルシウムでは堆積時間の影響はほとんど見られなかった。また

堆積初期における限界掃流力も $0.2 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}^2 \sim 1.1 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}^2$ と

各泥についてかなりのばらつきがみられた。これはそれぞれの泥

について組成がまったく異なっており、粘着性や凝集性、密度な

ど浮上に関与する特性因子の差によるためであると考えられる。

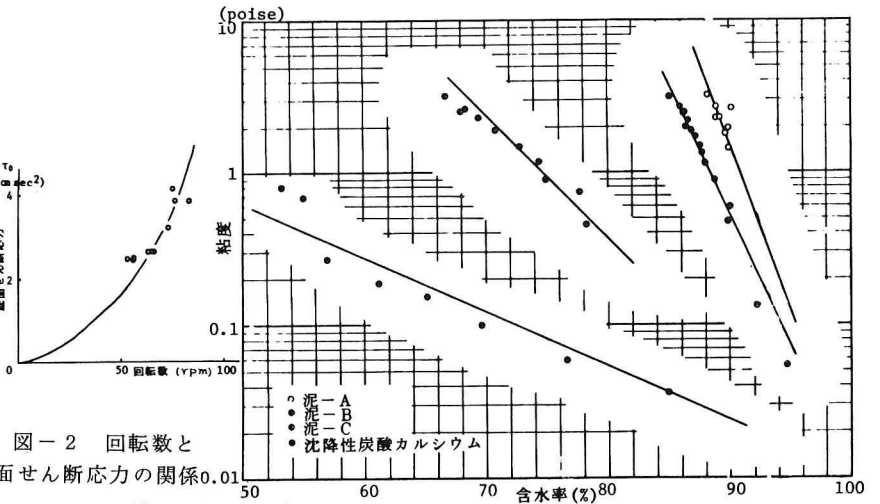


図-3 含水率と粘度との関係

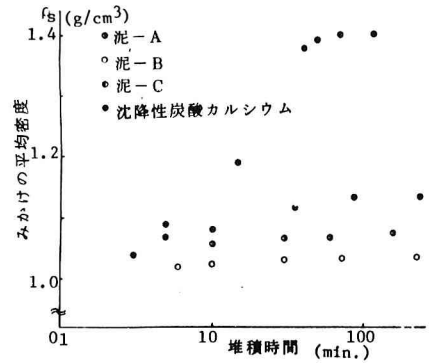
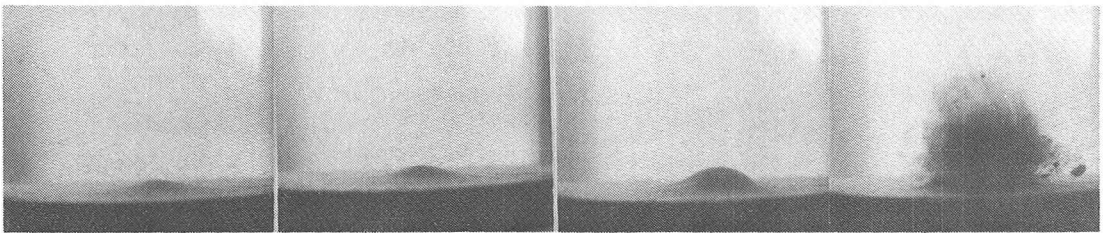


図-4 堆積物平均密度の時間的变化



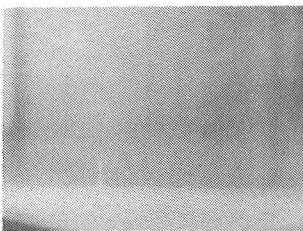
1

2

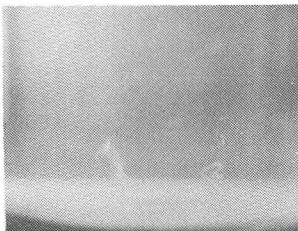
写真-1

3

4

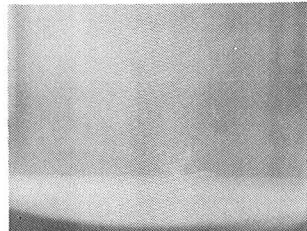


1



2

写真-2



3

4. 泥の限界掃流力に関する考察

4-1 粘着性を考慮した泥の限界掃流力について

二相間における物質交換は、上層が下層に与える力と下層の抵抗力との関係で決まると考えられる。いま上層が下層に与える力を τ_0 とする。下層の抵抗力を支配する量は、 εg 、 ρ 、 d 、 ν が考えられる。

ただし $\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ 、 d は下層物質の粒径、 ν は下層物質の動粘性係数、 ρ は上層流体の密度、 ρ_s は下層の密度、 g は重力加速度である。

これらの量から上層の力 τ_0 と下層の抵抗力とのつりあいを示す無次元量 F は次式となる。

$$F = \frac{\tau_0}{(\varepsilon g)^x \rho d^{3x-2} \nu^{2-2x}} = \frac{u_*^2}{(\varepsilon g)^x d^{3x-2} \nu^{2-2x}} \quad (4-1)$$

ただし $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$

下層物質が砂のように粘着性をもたず、粒径 d に支配される自重によって抵抗する場合には、式(4-1)において、 ν の指数部 $2-2x$ を0とおくことにより $x=1$ となって式(4-1)は次式となる。

$$F = \frac{u_*^2}{\varepsilon g d} \quad (4-2)$$

下層物質が微粒子であり、粒径 d の影響は小さく、おもに粘着力によって抵抗力を得る場合には、 d の指数部を0とおくことにより式(4-1)はつぎのようになる。

$$F = \frac{u_*^2}{(\varepsilon g \nu)^{2/3}} \quad (4-3)$$

$$F' = \frac{u_*}{(\varepsilon g \nu)^{1/3}} \quad (4-4)$$

下層物質が粘着性をもたず、重力によって上層からの力に抵抗するとして導かれた式(4-2)は、従来から研究されてきた流砂の限界掃流力を示す式にはかならない。また下層物質の粒径の効果を無視し粘性を考慮して導いた式(4-4)は、密度流における混合を支配するパラメータであるKeulegan数の逆数となっている。したがって流砂の掃流も、密度流における水質混合現象も式(4-1)で評

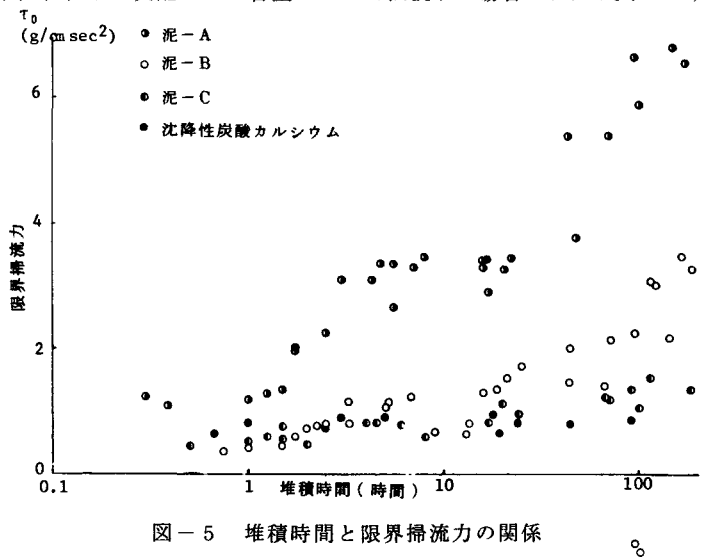


図-5 堆積時間と限界掃流力の関係

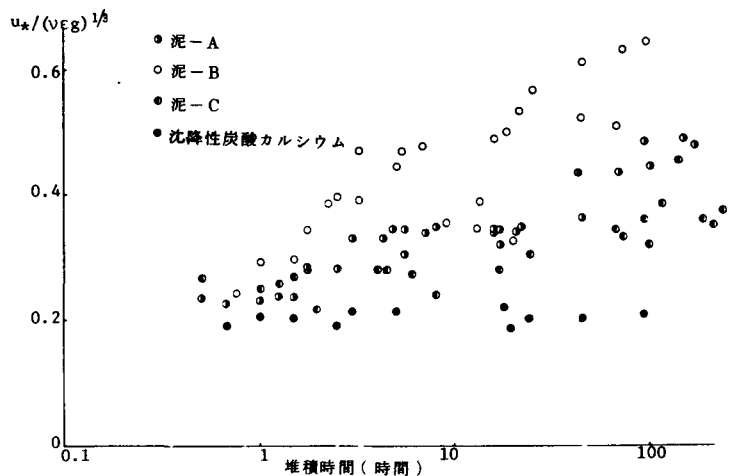


図-6 F' と堆積時間の関係

価される同一のものであり、ただ下層物質の抵抗力を支配する卓越的な因子が異なるにすぎないと考えることができる。

汚泥のまきあげを考える場合には、それぞれの泥の特性によってどちらの因子が影響を及ぼすかは異なってくるが、一般的には汚泥は微粒子であり、強い粘着性を示す場合が多く、式(4-4)を用いるのが適当である。これが従来から泥のまきあげには密度流としての扱いが多く行なわれてきた理由であると考えられる。

図-5の結果をパラメータ $F' = u_* / (\epsilon g \nu)^{1/3}$ を用いて整理したものが図-6である。堆積時間が2時間までの場合には、どの泥についても F' は0.2~0.3の値を示している。したがってどのような泥でもその粘度を知ることによって限界掃流力が計算でき、各種の異なった性状を示す泥のまきあげを一般的に考察することが可能となる。沈降性炭酸カルシウムでは堆積時間にかかわらず F' はほぼ一定であるのに対し、泥-A, Bは、堆積時間が3時間をこえるあたりから F' が増加し始める傾向がある。これは泥を静置することにより、抵抗力として上で考察した重力、粘着力の他に凝集力が無視できなくなるためであると考えられる。

4-2 凝集性に関する考察

図-6において堆積時間の短いうちは、各種の泥について F' はほぼ一定であり、泥の限界掃流力を統一的に考察することができるが、堆積時間の増加にともない、とくに泥-A, Bにおいて F' は増加する傾向がみられる。これは本研究で用いた粘度が泥を攪拌後すぐに計測した値であるために、下層の抵抗力として粘性だけを考慮しており、泥を静置したことによる凝集の効果を考えていないためであると考えられる。

泥の凝集性を考察するために、それぞれの泥について水中で3日間、5日間、10日間、15日間静置させた資料を同一の条件で処理(それぞれを100ccの蒸留水中40に投入、同一回転数で1分間攪拌)したもののについて、粒度分布を測定した。それぞれの粒度分布と、累積30% 粒径、60% 粒径の静置日数による変化を表わしたものが図-7-1、図-7-2である。静置日数0のものは分散剤(ヘキサメタリン酸ナトリウム0.1%溶液)中で攪拌した。

図-7によると、泥-A, Bは静置した時間が長くなるにしたがって明らかに大きな粒径のものが増加しており、静置による凝集性が強いことを示している。泥-Cは静置時間の経過により粒径はやや大きくなる傾向を示しているが、沈降性炭酸カルシウムについては粒径の変化はほとんどみられない。したがって泥-A, Bは堆積時間の増加にともない凝集力は大きく増加するが、泥-Cは凝集力の増加は小さく、沈降性炭酸カルシウムにおいては堆積時間による凝集による力の影響は無視できると考えられる。これが図-6において、泥-A, Bでは堆積時間にともない F' が大きく増加し、泥-Cでは F' がわずかに増加するのに対し、沈降性炭酸カルシウムにおいては F' の変化がみられない理由であると考えられる。

したがって凝集による抵抗力の増加を示すパラメータ c を定義することができれば次式によって泥のまきあげをさらに精度を高めて考察することが可能となるであろう。

$$F_c = \frac{u_*}{(\epsilon g \nu)^{1/3} \cdot c} \quad (4-5)$$

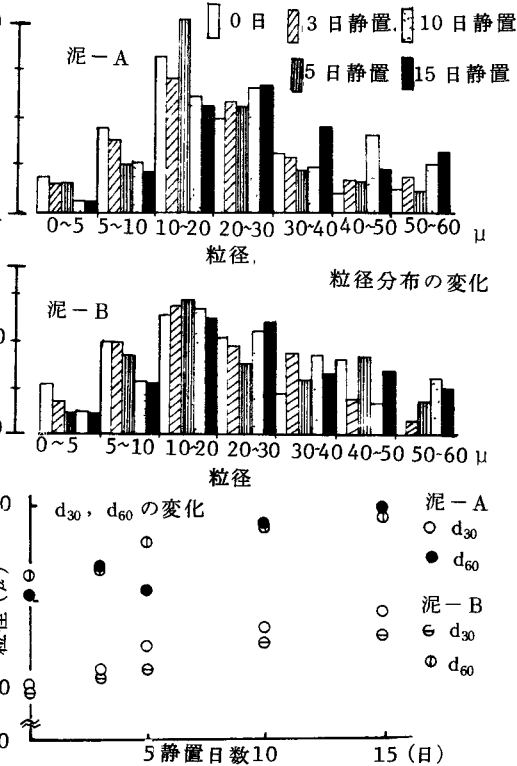


図-7-1 静置日数による粒径の変化

4-3 粘着性と粒径をとともに考慮した場合

泥-A, B, Cについては堆積後2時間程度まで、また沈降性炭酸カルシウムについてはつねに凝集による力を無視することができ、したがって式(4-4)を用いて泥のまきあげを一般的に評価することが可能であることが図-6で示されている。しかし $F' = 0.2 \sim 0.3$ としてほぼ一定であるとみなせるものの、密度流の場合のKeulegan数のように、一定値には近づかず若干のばらつきがみられる。泥の場合は密度流に比較すると粒子径ははるかに大きく、したがってさらに精度を向上させるには式(4-1)において、 d と ν の両方を考慮せねばならない。式(4-1)を整理するとつぎようになる。

$$F = \frac{u_*^2 d^2}{\nu^2 \left(\frac{\epsilon g d^3}{\nu^2} \right)^x} \quad (4-6)$$

よって $u_*^2 d^2 / \nu^2$ と $\epsilon g d^3 / \nu^2$ との間に一定の関係があることが予想される。

堆積時間が2時間までのものについて $\nu^2 / u_*^2 d^2$ と $\epsilon g d^3 / \nu^2$ の関係を示したものが、図-8である。図中の実線の傾きは-0.63である。したがって粘着性と粒径を考慮し、凝集による力を無視できる場合は、次式で汚泥の限界掃流力を評価できる。

$$F = \frac{u_*^2 d^2}{\nu^2 \left(\frac{\epsilon g d^3}{\nu^2} \right)^{0.63}} \quad (4-7)$$

図-8においても若干のばらつきがみられるが、これは粒径に分布があるためと考えられる。本図においては d として累積50%粒径 d_{50} を用いた。均等係数は2.4~3.0であった。

5. おわりに

本研究は、種々の特性をもつ泥のまきあげについて、粘着力、凝集力、粒径などをパラメータとして統一的に評価することを試みたものである。その結果、従来から行なわれてきた掃流砂、密度流における混合は、ともに同一の式で評価することができ、ただ支配的なパラメータが異なるにすぎないことを示すとともに、泥は両者の中間的なものであることを示すことができた。さらに、それぞれの泥について粘着力、凝集力、粒径を知ることができれば、限界掃流力を一般的に評価できることを示したと考えている。

参考文献

- (1) 細井由彦, 白谷章, 住友恒: 底泥のまきあげに関する実験的研究, 土木学会第33回年次講演会講演集 1978
- (2) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, 1956

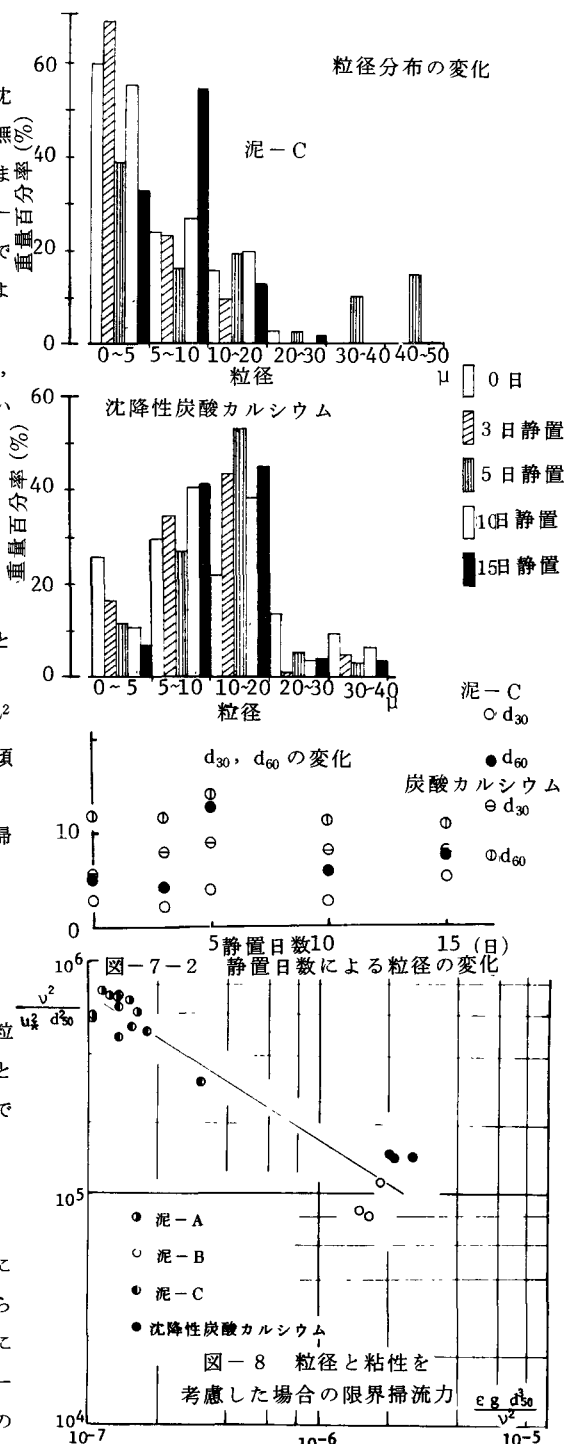


図-8 粒径と粘性を考慮した場合の限界掃流力