

(4) 底泥の巻き上げに関する基礎的研究

九州大学工学部

栗谷 陽一

"

楠田 哲也

"

○海田 輝之

1. はじめに

底泥の巻き上げによる二次汚染の問題は、水質環境保全にとって重要な問題であるにもかかわらず放置されているのが現状である。砂粒のような非凝集性土の限界掃流力、掃流量については、Shields, 岩垣, 栗原らの多くの研究があるが、河川、海域や河口感潮部に堆積した汚泥は凝集性を有しており、非凝集性土とはその挙動が異なり、また、その物性の複雑さにもより、凝集性土についての巻き上げに関する研究は非常に少ない。

底泥の巻き上げの実験を行う際の底泥の形成方法としては、次の2つの方法が考えられる。

① 水中における重力沈降により底泥を形成する方法

② 汚泥の含水比をある値に定め、これを水路に敷く方法

①は、自然環境中で形成された汚泥の再浮上を考える場合に有利であるが、汚泥の力学的性状と巻き上げとの関係を求める場合や、限界掃流力を求める場合には②の方が容易である。

本研究では②の方法を用いた。混合粒径の凝集性を有する試料として、浄水場汚泥と粒度分布が異なる3つの粘性土を取りあげ、底泥の巻き上げの基礎的研究として、含水比や粒度分布が違う場合の限界掃流力を求め、さらに、汚泥表面の粗度の変化と抵抗係数との関係を明らかにし、底泥上の水流特性として、平均流および乱れ強度について若干の考察を加えたものである。

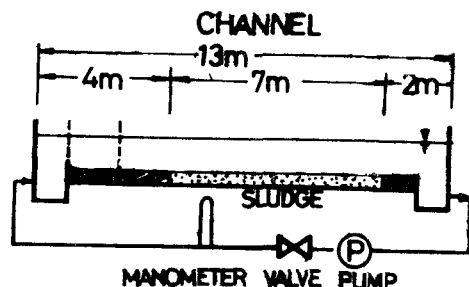
2. 実験装置及び方法

実験に用いた水路の概略を図1に示す。水路は可変勾配循環水路で、長さ13m、幅0.87m、上流部には整流板と3mの助走区間、中央部には7mの汚泥を敷く区間、下流端に1mの整流区間を設けた。上流側助走区間と汚泥部との段差による巻き上げを防止するため0.5mの傾斜板を取りつけた。水面勾配の測定にはビトー管及び水とトルエンを二液マンノメーターとしたチャトックゲージを用いた。この時のビトー管は底泥下端からはば1mと4mの位置に設けた。循環水量はオリフィスにより測定した。実験に際しては、所定の含水比に調整した汚泥を水路床に4～5cmの厚さに敷き詰め水を流した。流量を一定に保ち、循環水量を減ずるか(この場合、水深基準のレイノルズ数が一定となる)、循環水量を一定にし流量を増加させることにより、30～40分間隔で掃流力を増加させた。また上流端で10分間隔でサンプリングし、濁度計で浮遊物濃度を測定した。上流端では、巻き上げられた汚泥はポンプで混合されるため、水深方向の濃度分布は無視できる。掃流力 τ_w 、及び摩擦速度 U_* は、 $\tau_w = \rho g R I$ (ρ : 流体密度,

g : 重力加速度, R : 径深, I : 水面勾配), $U_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$

として求めた。限界掃流力 τ_{wc} の定義は、砂粒にくらべ本研究のような粘性土では非常に困難であり、肉眼による観察法^①があるが本研究では単位時間当りの浮遊物濃度の変化量が急増する時の τ_w と定義した。また流速を下流端より2.15mのところで、プロベラ流速計、及び2成分ホットフィルムにより測定した。

実験に用いた試料は、底泥として福岡市箱崎浜高速道路工事現場からの粒度分布が異なる3つの粘性土、及び福岡市乙金浄水場汚泥である。浄水汚泥のうち1つは、試料採取後約



図一1. 実験装置

1ヶ月放置したもので、嫌気的になったものと、採取後1週間以内に実験を行った好気性のものである。粘性土の降伏値、及び塑性粘度は、コーンプレート型粘度計(コーン径81mmφ、頂角172.8°、平均径0.71mmφのガラス球をすべり止めに張りつけたもの)を用いて求めた。浄水場汚泥の降伏値、及び塑性粘度は内径19mmφ、全長2.5mのアクリル樹脂製管路に汚泥を流し、種々の流量について損失水頭差(測定区間1.40m)を圧力変換器で測定し、次式^③より求めた。

$$Q = \frac{\pi R^4 \rho g}{8 \mu_B L} \Delta H - \frac{\pi R^3 \tau_y}{3 \mu_B} \quad \tau_y = \frac{3 \rho g R}{8 L} \Delta H$$

ここに、Q：流量， [cm/sec]

R：管の半径， [cm]

ρ ：汚泥密度， [g/cm³]

L：測定区間， [cm]

τ_y ：降伏値， [dyne/cm²]

μ_B ：塑性粘度， [poise]

降伏値は両方法とも Bingham 流体として、流動状態から静止状態への外挿値を採用した。粘性土の粒度分布は、JISA 1204 に従い、浄水場汚泥の粒度分布は顕微鏡写真から体積分布として求めた。その結果を図2に示す。

各試料の比重Gsは次の通りである。

A：2.73，B：2.73，C：2.66，D：2.72，E：2.66，

また強熱減量比は、A：5.1%，B：8.2%，C：5.4%，D：28.3%，E：25.5%であった。実験時のレイノルズ数は、ほぼ 1.5×10^5 で、完全乱流下で実験を行った。

3. 実験結果及び考察

3-1 粘性土について

図3は汚泥Bの含水比82%，201%，300%での巻き上げ量の時間変化例である。縦軸は累積浮遊物濃度を示す。これより巻き上げはどの含水比においても、ある掃流力以下ではほとんど起らず、掃流力を増加させると巻き上がり始め、さらに掃流力を増加すれば、巻き上げ速度(図の勾配)も増加することがわかる。さらに掃流力を増すと洗堀が生じ、急激に浮遊物濃度が増加したが、本報告では洗堀が生じる前までを考えている。

図4にコーンプレート粘度計で求めた汚泥の降伏値と含水比との関係を示す。3つの汚泥とも片対数紙上ではほぼ直線にのることがわかる。また、粒度分布幅が狭く、平均径が小さい汚泥程(Cの方)含水比の増加による降伏値の減少が小さく、同じ含水比では、降伏値は大きくなることがわかる。これは塑性指数が、A：11%，B：41%，C：56%で粘着力が大きくなっていること、粒径が小さくなる程間隙が大きくなり、保持水量が多くなるためと考えられる。

図5、図6に限界掃流力、及び流れを等流とみなして求めたマンギの粗度係数と含水比との関係を示す。限界掃流力は、3つの汚泥とも全体的には減少しており、1～5 dyn/cm²程度である。また、汚泥A、Bは限界掃流力に極小値が存在するが、汚泥Cは明瞭でない。粗度係数にも汚泥A、Bには極小値が存在し、

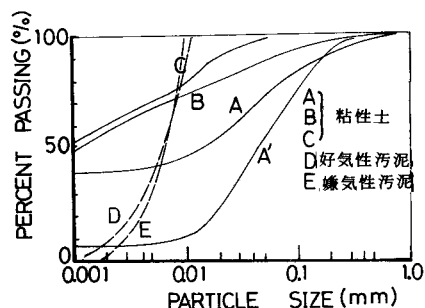


図-2. 試料粒度分布

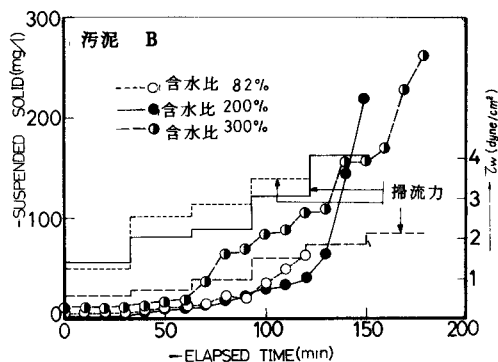


図-3. 掃流力と汚濁物濃度との関係

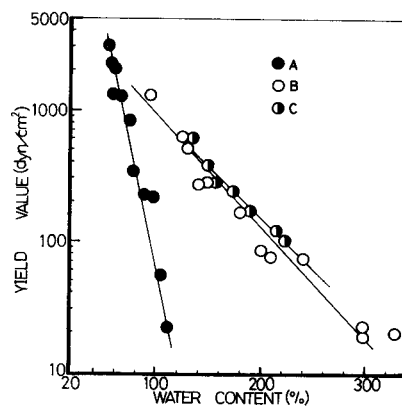
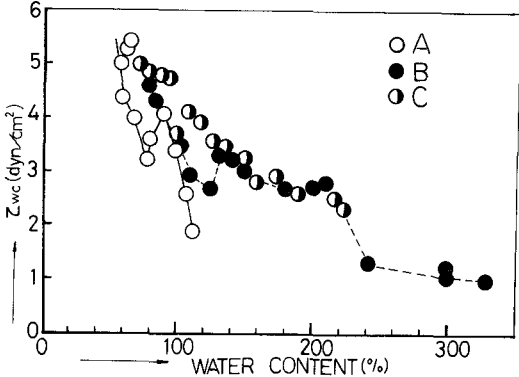


図-4. 汚泥降伏値と含水比との関係

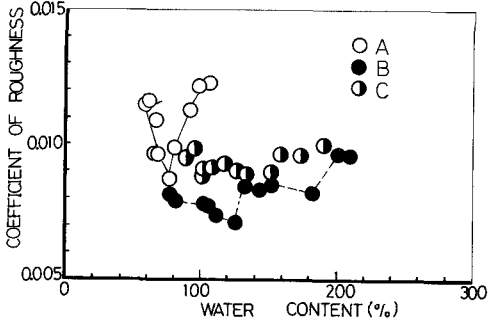
両者の極小値が同一の含水比において生じるのが特徴的である。汚泥Cでは大きな変化はない。

含水比にしたがつて、汚泥の性状、及び巻き上げ状態を順次みてみると、汚泥Aでは、含水比70%以下、汚泥Bでは100%以下、汚泥Cでは120%以下の時には、汚泥は自重では平らにならず、「コテ」を用いて平らにする必要がある。実験終了時には、「コテ」の跡が残っている。従つて、この含水比の間では、汚泥表面の突き出た部分や弱い部分が削られるように剥されていき、粗度係数として「コテ」の跡形や、汚泥の敷き具合も影響していると考えられる。

限界掃流力が極小値のところでは、Bingham体としての降伏値がA、B両汚泥ともほぼ300dyn/cm²であり、この含水比では、水路に汚泥を敷く時自重でほぼ平らになり「コテ」を使用する必要はなくなる。このため、粗度係数、限界掃流力は含水比の低いものに較べて低下する。汚泥Cでは含水比160%、降伏値300dyn/cm²のところで、同様に限界掃流力は低下している。しかし汚泥Cは、汚泥Bと粒度分布、降伏値があまり変らないにもかかわらず、後で述べるように、実験終了時の汚泥表面や汚泥中の状態は、汚泥A、Bと大きく変つており、含水比160%の実験値を示す点は実験誤差なのか、あるいは汚泥の降伏値が300dyn/cm²程度で極小値を示しているのかは明らかでない。極小値のところで摩擦損失係数fを検討する。汚泥が滑面として、次式



図一 5. 限界掃流力と含水比との関係



図一 6. 粗度係数と含水比との関係

κ : Karman定数
 U_* : 摩擦速度 (cm/SEC)
 h : 水深 (cm)
 ν : 動粘性係数 (cm²/SEC)

$$f = 2 \left(3.0 + \frac{2.3}{\kappa} \log_{10} \frac{U_* h}{\nu} \right)^{-2}$$

を用い、 $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{SEC}$, $\kappa = 0.4$ とし、実験時の U_* と h より

汚泥A (含水比78%) では

$$U_* = 1.79 \text{ cm/SEC}, \quad h = 33.3 \text{ cm} \quad \text{---} \quad \bullet$$

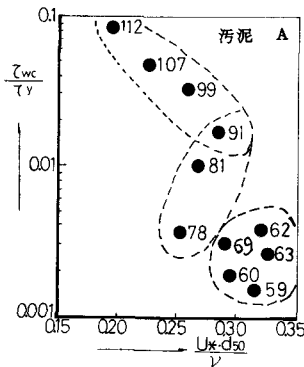
$$f = 0.0033,$$

汚泥B (含水比127%) では

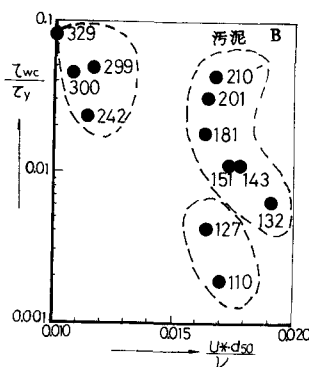
$$U_* = 1.64 \text{ cm/SEC}, \quad h = 24.1 \text{ cm}$$

$$f = 0.0036$$

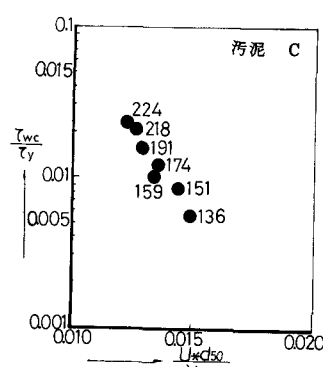
一方、 $f = 2 (U_* / \nu)^2$ ν : 平均流速 (cm/SEC) より汚泥Aでは $\nu = 45.0 \text{ cm/SEC}$ で $f = 0.0032$



図一 7-1. 巻き上げの無次元表示



図一 7-2. 巻き上げの無次元表示



図一 7-3. 巻き上げの無次元表示

汚泥 B では、 $v = 62.2 \text{ cm/sec}$ で、 $f = 0.0014$ となり、実際の汚泥には起伏があるにもかかわらず、水理学的滑面より、さらに滑らかになっていることがわかる。摩擦損失係数の減少については、後でさらに考察する。

次に、極小値をすぎると、汚泥 A では 80～90 %、汚泥 B では 140 % で、限界掃流力、粗度係数共に増加する。実験終了時の汚泥表面には、リップルが生じており、また、この汚泥表面は微粒子が流され粗い粒子のみが留まった状態になっており、リップルの谷から谷までが一枚の板のようになっていた。armoring のため、この表層部の粒度分布は図 2 の A' に極めて近い。リップルは汚泥 A、B では明瞭に観察されたが、汚泥 C ではリップルはほとんど生じなかった。

さらに汚泥含水比が増加する（汚泥 A では 90 % 以上、汚泥 B では 240 % 以上）と、実験終了時には、リップルの頂点付近の armoring 現象は起こらないが、リップルの谷の真下で谷に沿って細長い粗粒子塊群が存在した。これは汚泥の含水比が高く流動性が良いため、粗い粒子を表面で支えることができなくなり、リップルの谷の部分に輸送され沈んだものと考えられる。また、この粗粒子塊は、汚泥 A が良く発達し、汚泥 B では小さく少なくなり、汚泥 C では観察されず、汚泥の粒度分布による違いが明らかであった。また、このような含水比になると汚泥界面では密度流でみられるような界面波が生じ、巻き上げが界面波の進行と共に起こるのが観察された。密度流との類似性については、後でさらに検討する。

含水比がさらに高くなる（汚泥 A では 110 %、汚泥 B では 300 %）と、汚泥を水路床に敷いた時、底部に粗い粒子が沈むため、鉛直方向に粒度分布が生じた。底部の汚泥の粒度分布は、図 2 の A' であった。

以上、粒度分布が異なる 3 つの試料について、汚泥の含水比の違いによる巻き上げ現象と汚泥表面や汚泥中の状態について述べたが、巻き上げは、汚泥の粒度分布および汚泥の含水比、即ち、含水比の変化による汚泥強度や汚泥の粘塑性により大きく変わることがわかる。巻き上げ現象に関連すると思われる量として、汚泥の降伏値 τ_y 、塑性粘度 μ_B 等を用いて作られる無次元量の間の関係を求めると図 7-1, 2, 3, 図 8-1, 2, 3, が得られる。図中の数字は含水比である。無次元量の検討は不十分であろうが、これより汚泥 A および B では、図中に破線で囲んだように巻き上げ現象は大きく 3 つの領域に分けられる。即ち①汚泥の含水比が低く汚泥自体の強度が影響する領域、②混合粒径の特徴として armoring 現象が表われる領域、③密度流と類似した状態を示す領域、である。また、汚泥 C では、前述したように汚泥 A および B と巻き上げ現象が異なっていた事がこの図より明らかである。

◎ 粘性土の巻き上げへの砂粒限界掃流力理論の適用について

本研究で用いた試料を非凝集性土とみなし、砂粒としての限界摩擦速度を求めてみる。

④ 岩垣の式では、

汚泥 A では、 $d_{50} = 0.0014 \text{ cm}$, $G_s = 2.73$, $\nu = 0.01 (\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}})$ | 汚泥 B では、 $d_{50} = 0.0001 \text{ cm}$, $G_s = 2.73$

$$R_* = [(G_s - 1)g]^{1/2} \cdot d^{3/2} / \nu = 0.21 < 2.14$$

$$U_{*c} = [0.14(G_s - 1)g \cdot d]^{1/2} = 0.58 (\frac{\text{cm}}{\text{sec}}) \text{ となる。}$$

$$R_* = 0.004 < 2.14$$

$$U_{*c} = 0.15 (\frac{\text{cm}}{\text{sec}}) \text{ となる。}$$

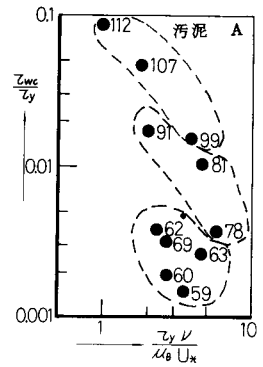


図 8-1. 巻き上げの無次元表示

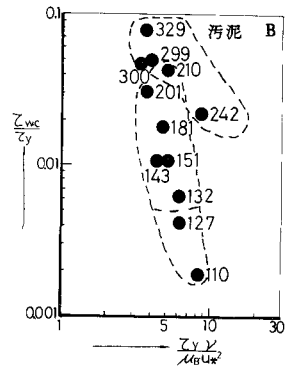


図 8-2. 巻き上げの無次元表示

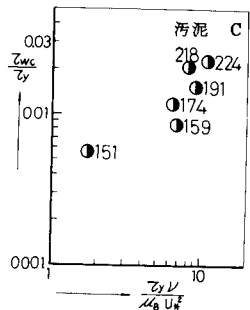


図 8-3. 巻き上げの無次元表示

⑨栗原の式では、

汚泥 A について、図一 2 の粒度分布曲線より、 $\beta = 1.97$

$$X = [1.02 \times 10^{-7} \cdot (g/\beta \nu^2) (G_s - 1)]^{1/3} \cdot d = 0.0013, \log_{10} X = -2.9 < -1.0$$

$$U_{*c} = [\beta (G_s - 1) g \cdot d \cdot [-0.047 \cdot \log_{10} X - 0.023]]^{1/2} = 0.73 \text{ cm/sec}$$

となり、本実験で得られた限界摩擦速度 U_{*c} の最小値、汚泥 A で、 1.79 cm/sec 、汚泥 B で 1.64 cm/sec に比べても、かなり小さい値を与え一致しない。従つて、凝集性が無視できないと考えられる。

◎密度流理論の適用について

汚泥含水比が高い場合、界面現象が密度流と類似していることを前に述べた。そこで密度流理論が適用できるかどうか検討してみる。界面抵抗係数について考える。

$f = 2 \left(\frac{U_*^2}{v} \right) \text{ より}$	汚泥 A (含水比 110 %) では $U_{*c} = 1.38 \text{ cm/sec}, \quad f = 0.047 \text{ となる。}$	汚泥 B (含水比 330 %) では $U_{*c} = 1.00 \text{ cm/sec}, \quad v = 13.2 \text{ cm/sec}$ $f = 0.011 \text{ となる。}$
---	---	---

一方、密度流としての界面抵抗係数^⑤は、一般に

$$f_i = a \varphi^{-n} \text{ の形で示され、}$$

$$\varphi = \text{Re} \cdot (F_i) = \frac{v_1^3}{\varepsilon g \nu}$$

である。

但し Re: 上層流の水深基準のレイノルズ数 $h_1 u_1 / \nu$, u_1 : 上層流流速

F_i : 上層流の内部フルード数 $u_1 / \varepsilon g h_1$, h_1 : 上層流水深

$\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$, ρ_2 : 上層流密度, ρ_1 : 下層流密度

汚泥 A では、 $\rho_2 = 1.43 \text{ g/cm}^3$, $\varepsilon = 0.30$, $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ で $\varphi = 248$, 汚泥 B では、 $\rho_2 = 1.17 \text{ g/cm}^3$

$\varepsilon = 0.15$, $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ で $\varphi = 1564$ となる。例えば椎貝の $a = 12.0$, $n = 1.0$, 須賀, 高橋の

$a = 0.35$, $n = 0.5$ を用いると、汚泥 A では各々 $f_i = 0.048, 0.022$, 汚泥 B では $f_i = 0.008, 0.009$ となり

密度流としての界面抵抗係数にほぼ等しくなる。そこで、汚泥の巻き上げ現象が、内部波の碎波現象に対応するものとして、Keulegan の二層流における内部波の安定条件を検討してみる。即ち Keulegan 数

$$\theta = \frac{(\varepsilon g \nu)^{1/3}}{U_1}$$

を求めると、汚泥 A では $\theta = 0.16$, 汚泥 B では $\theta = 0.109$ となり、Keulegan の与えた安定条件 $\theta = 0.178$ と較べ、汚泥 A では一致するが、B では若干異なる。しかし、巻き上げ現象を密度流の碎波理論のみで解析することは危険であると思われる。特に本例のように ε が大きい (密度差が大) 場合、水路床の汚泥を流体と考えるのが妥当かどうかは疑問である。

◎底泥上の水流に対する摩擦損失について

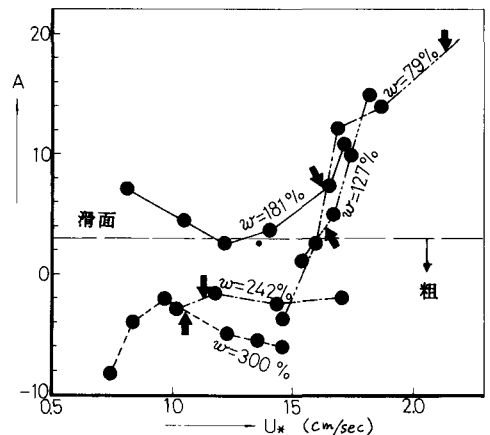
前述した様に、汚泥表面では摩擦損失係数が異常に小さい値となることがあり、特に小さい場合には滑面

に対する値より更に小さくなった。この現象を明瞭に示す

ために滑面に対する流速公式

$$\frac{v}{U_*} = \frac{2.30}{\kappa} \log_{10} \frac{U_* h}{\nu} + A \text{ を用い検討してみる。}$$

まず、汚泥が巻き上げられることにより生じる濁度勾配による κ について検討するため、プロベラ流速計を用いて流速分布の測定を行なった。この結果、平均浮遊物濃度で 40 mg/l , 245 mg/l , 350 mg/l の時、 κ は各々 $0.40, 0.38, 0.36$ となり、巻き上げ後でも 0.36 程度に留まり、その影響はあまり大きくないと考えられる。但し、流速の測点は、最低点でも界面から 1 cm であり、それ以下では明らかでない。そこで簡単のため $\kappa = 0.4$ として、平均流速 v 、摩擦速度 U_* の実測値から A の値を逆算してみる。滑面に対しては、



図一 9. 摩擦速度と定数 A との関係

$A = 3.0$ である。汚泥 B での U_{*} に対する A の値の変化を示したのが図 9 である。図中の矢印は巻き上げ時を示す。これより①、汚泥含水比が低い時、巻き上げ前は汚泥自体の粗さにより A の値は小さく、巻き上げ時に近くなるにつれ粗さが少なくなり、巻き上げが生じると汚泥表面近くの浮遊粒子により乱れがおさえられるため A の値は大きくなる。②汚泥含水比を増すと（181%）、汚泥の流動性が良いため汚泥の塑性あるいは粘性によるエネルギー吸収のため即ち flexible boundary として汚泥が動くために A の値が小さくなる。また巻き上げが起ると①と同様に浮遊粒子の影響が表われる。③、含水比が高くなると密度流に近くなり内部波による抵抗のため A の値は小さくとなると考えられる。さらに界面近傍の様子を明らかにするため、熱膜流速計を用いて 2 成分（流れ方向と水深方向）の乱れ強度を測定した。その結果を図-10 に示す。浮遊物の影響のため測定精度は良くないが、図中で示した Laufer の実験値と較べ、本実験での u/U_{*} は汚泥表面近くで小さくっており巻き上げられた粒子による乱れ強度の減小が明らかである。

3-2 浄水場汚泥について

表 1 に限界掃流力と種々の値を示す。含水比 w 及び汚泥密度 ρ は水路床に汚泥を敷いた時点での値である。降伏値 τ_y 及び粗性粘度 μ_B は、汚泥の含水比及び密度と密接に関係していることが解る。また、好気性及び嫌気性汚泥とも限界掃流力は $0.7 \sim 1.0 \text{ dyn/cm}$ 程度であり両者の差はみられない。これは、図-2 に示した様に両者の粒度分布型がほぼ等しい事、強熱減量比が同程度である事及び汚泥の含水比が非常に高い事から、好気、嫌気という汚泥の状態の相違には関係しなくなつたと考えられる。さらに、両汚泥とも実験中に汚泥厚が $1/4$ 程度減少するのが観察された。このことは、汚泥の密度が実験中に増加する事を示しており、そのため、初期の含水比や汚泥密度と限界掃流力に明確な関係が得られなかつたのではないかと考えられる。また著者らが行なつた活性汚泥の巻き上げでは表層の好気性部が剝離しその後下層の嫌気性部が好気性になり剝離したが、浄水場汚泥では、この様な状況は観察されなかつた。これは浄水場汚泥の有機物（特に生物）含有量が少ないためと考えられる。

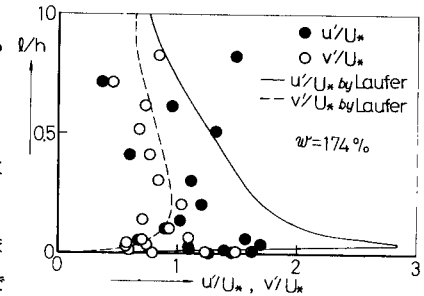


図-10. 濁質を含む時の乱れ強度

表-1. 浄水場汚泥

4 まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下の様になる。

- ①凝集性汚泥の巻き上げは、汚泥の粒度分布及び汚泥の含水比の変化による汚泥の物性に大きく影響される。
- ②凝集性を有する汚泥の巻き上げには砂粒の掃流力理論を適用できない。
- ③汚泥含水比が高い場合には、密度流と類似してくるが、密度流の砕破理論を巻き上げ現象に適用するには無理であろうと考えられる。
- ④底泥上で水理学的滑面よりなお滑らかになる時がある。

最後に、本研究を行なうにあたり、協力して下さつた九大大学院生 蒲地政文君に心から感謝いたします。なお；本研究は文部省科学研究費補助（一般研究 C）を受けて行なつたものである。

参考文献

- 1) 村岡治爾：流れによる底泥浮上と水質の関連 第18回水理講演集 P181～186
- 2) 後藤，平井，花井：レオロジーとその応用 P38～40 共立出版
- 3) R.B.Bird et al.: TRANSPORT PHENOMENA p48-50 WIE
- 4) 水理公式集：P200～201 土木学会編
- 5) 文部省科研費「成層密度流の界面現象に関する水工学的研究」報告書
- 6) Laufer J.: The structure of turbulence in fully developed pipe flow NACA TR-1174, 1954
- 7) 栗谷，* 楠田，海田：底泥の巻き上げに関する研究（Ⅱ）土木学会第33回年次学術講演会講演概要集 第2部 P 309～310 1978.9
- 8) 楠田，山崎，田中，栗谷：活性汚泥の巻き上げに関する基礎的研究 下水道協会誌 13，144，P 11～16，1976.5