

底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究

PHYSICAL PROPERTIES AND CRITICAL SHEAR STRESS OF COHESIVE BOTTOM SEDIMENTS

大坪国順*・村岡浩爾**

By Kuninori OTSUBO and Kohji MURAOKA

The main purpose of this experimental study is the estimation of critical shear stress of cohesive bottom sediments. The resistance properties against currents are mainly controlled by the electro-chemical bond between individual particles. Hydraulic experiment and physico-chemical test were performed. Bottom sediments were divided into two groups according to characteristics of settling form, flow curve and resuspension behavior. The main factor which controls those characteristics was found to be the nature of cations adhering to particle's surface. For bottom sediments two critical shear stresses were defined from the resuspension behaviors. They showed linear relation with respect to viscosity and yield value on log-log paper but the relations were different between two groups.

1. 緒 論

河口部や浅い湖沼において、底泥粒子は流れにより沈降、再浮上を繰り返している。底泥が水中に浮上すると、底泥間隙水中に溶存している栄養塩類が同時に水中に解放される。底泥の直接攪乱に起因する栄養塩類の回帰量を推定する際、底泥の浮上量（厚さ）は不可欠の要素となる。本研究は浮上量を推定するうえで必要となる底泥の限界掃流力の定式化を目的とした実験的研究である¹⁾。

底泥の浮上・流送に関する研究は、浮上特性の基本量である底泥の限界掃流力や飛び出し率を取ってみても、それらを明確に定量化したものは非常に少ない。これは底泥が微細粒子であり、砂粒のように粒子に作用する力を流体力と重力のみに限定できず、粘着力や凝集力などの表面力が支配的になるためである¹⁾。粒子間の粘着力に影響を及ぼす因子は、粘土の種類やその構成比に始まり、塩分濃度、吸着陽イオン、有機物などの膠結物質等さまざまなものがあり、それらが相互に関連し合っている。底泥の粒子間に作用する力を、内部機構まで立ち入っ

て定量的に把握するのは現状では不可能である。土粒子の分散・凝集を証明する土粒子周辺の電気ポテンシャルの分布なども単純理想化した状態での理論であり、それらは粒子間の相互作用についてある程度原則を示してはいるが、実際の粘着性土に対してその粘着力や凝集力を提示することはできない。そこで筆者らは、粘着力に及ぼす影響をマクロ的に反映している物性項目を見出すために、限界掃流力を求める流送実験のほか、底泥の基本的物性を明らかにする各種物理試験および沈降特性や流動曲線（せん断力とずり速度の関係を示す曲線）についての系統的な実験を行った。

2. 実験の種類および方法

a) 基本的物性 底泥の粒度構成や有機物含有量などが底泥の浮上・流送の現象に及ぼす影響はかなり大きい。研究対象とする底泥試料の基本的物性を明らかにすることは底泥の浮上・流送特性を検討するうえでも底泥を分類するうえでも重要である。含水比に関与しない土の状態量として、比重、粒度、コンシステンシー指数および灼熱減量比を選んだ。これらの基本物性項目は、底泥の限界掃流力や飛び出し率と直接に関係付けられることはないにしても、何らかの相関や定性的な傾向を示す。

* 正会員 工博 国立公害研究所研究員 水質土壌環境部
(〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16-2)

** 正会員 工博 国立公害研究所室長 水質土壌環境部
(同上)

粒度分布の測定には液相沈降法である光透過法と遠心沈降法を併用した。測定の際、試料は湿潤状態のままプロペラ攪拌のみで分散させた。灼熱減量比は、試料を600°Cで3時間焼結する方法で求めた。

b) 限界掃流力 限界掃流力を求める流送実験に用いた水路は、透明アクリル製の長方形断面（幅15 cm×高さ5 cm）管路である。上流端から4.5 m下流に、長さ90 cm×幅10 cm×高さ2 cmの移動床区間がある。固定床は、底泥の表面状態が滑面（平坦床の場合）であることから、アクリル壁のままにした。移動床部の50 cm下流に流れを強制的に攪拌させる区間を作り、さらにその約30 cm下流に濁度測定区間と採水孔を設けた。管路には、1 mごとに圧力測定用タップを取り付けた。限界掃流力を求める実験においては、移動床区間の中央部の3分の1を移動床として、その部分にびったり収まる深さ1.5 cmの試料箱を用意し、試料箱に所定の含水比の底泥を充填した。流量を所定の増加率で漸次増加させ、限界時にピエゾ水頭勾配と流量の読み取り、採水を行う。限界の判定には、目視による方法とレーザー濃度計の出力の変化から判定する方法とを併用した。この判定基準には主観的要素が入るが、この段階では砂粒の場合のような確立された判定基準がないためやむを得ないと考えられる。Table 1の左欄は基本的物性と限界掃流力を求めた底泥の種類である。原則として、限界掃流力は1つの底泥に対して6種類の含水比条件で求めた。

No. 1~No. 18は、有機物の種類や量が底泥の基本的物性と限界掃流力に及ぼす影響を検討するために、カオリナイトおよびベントナイトに澱粉もしくは寒天を含有させたものである。両有機物を選んだ理由は、これらが汚泥や底泥中に存在すること、含有率が粘土鉱物の陽イオン交換容量や荷電状態によらず決められること、含有させやすいことである。No. 20~25のシリーズは、底泥成分の変化が限界掃流力に与える影響を検討するために、霞ヶ浦底泥に化学的処理を施したものである。以下、Kasumi Mud 1は無処理泥、Mud 2はH₂O₂（濃度30%）による有機物除去処理泥、Mud 3およびMud 4はMud 2にそれぞれ澱粉および寒天を10%混入させたもの、Mud 5はベンゼン+エタノールによる脂肪除去処理泥、Mud 6はNaOH（濃度1規定）による腐植除去処理泥である。また、No. 26~No. 33は湖沼泥もしくは湖沼沈殿物であり、No. 34以下は河口泥である。

c) 沈降実験 沈降実験に用いた沈降筒は、内径60 mmの透明アクリル円筒である。沈降筒の下部は二重栓になっている。実験終了後に下のゴム栓を抜き、残ったもう一つのゴム栓ごと底泥を押し出すことによって、最終状態での含水比測定用のサンプルを採取する。実験の手順としては、蒸留水を加えて目的の初期含水比に調整し、24時間蒸留水になじませた後、5分間攪拌して均一にする。それを沈降筒に流し込み蓋をして静置する。このときを実験開始時刻として、その後適当な時間間隔で、界面高さもしくは沈積面高さを測定する。今回の実験では、原則として6日後（144時間後）を最終状態とした。実験終了後は前述の方法で底泥のサンプルを採取した。初期沈降高さH₀（今回の実験では沈降筒高さに等しい）は230 mmと115 mmの2種類とした。

d) 流動曲線 流動曲線の測定には内筒が回転するサーレ型二重円筒式回転粘度計を用いた。回転粘度計の特徴は、操作が簡便で、試料が少なく済むことである。しかし、今回用いた装置の最大の特徴は必ず速度の

Table 1 Results of soil test for clays and bottom sediments.

Bed materials	dm [μ m]	ds0 [μ m]	Od [μ m]	σ/ρ	VSS [%]	Wp [%]	WL [%]	p [%]
1 Kaolin	6.5 (4.2)	5.5 (2.0)	4.7 (3.8)	2.6 0	2.3	38.54	51.05	12.54
2 Kaolin+Starch (5%)						34.23	46.70	12.47
3 Kaolin+Starch (10%)	7.1 (4.4)	5.0 (2.5)	6.4 (3.6)	2.4 8		27.87	42.28	14.41
4 Kaolin+Starch (15%)						22.68	42.54	19.86
5 Kaolin+Starch (20%)	[4.10]	[2.0]	[3.7]			16.58	45.04	28.46
6 Kaolin+Agar (5%)						33.90	155.40	121.5
7 Kaolin+Agar (10%)	[41.0]*	[22.0]	[47.0]*	2.4 8		49.80	225.0	175.2
8 Kaolin+Agar (15%)						57.70	246.9	189.2
9 Kaolin+Agar (20%)						49.30	329.8	280.5
10 Bentonite	14.41 (14.4)	10.0 (5.0)	16.8 (16.3)	2.6 0	1.6 3	32.95	186.5	153.5
11 Bentonite+Starch (5%)	[13.2]	[4.0]	[16.3]			24.80	167.5	142.7
12 Bentonite+Starch (10%)	16.50 (13.60)	11.0 (8.0)	16.3 (17.12)	2.4 8		21.74	162.5	140.8
13 Bentonite+Starch (15%)	[13.0]	[3.0]	[17.4]			22.17	164.8	142.3
14 Bentonite+Starch (20%)	[13.3]	[2.5]	[17.5]			20.73	151.2	130.5
15 Bentonite+Agar (2.5%)						29.30	242.9	213.6
16 Bentonite+Agar (5%)						29.40	276.6	247.2
17 Bentonite+Agar (10%)	[40.0]*	[27.5]	[45.0]*	2.4 8		34.70	250.3	215.6
18 Bentonite+Agar (15%)						39.30	316.7	277.4
19 Montmorillonite	2.1	0.8	2.2	2.6 0	0.6 4	45.3	354.0	308.7
20 Kasumi Mud 1	20.7	11.0	21.3	2.4 2	17.1 2	70.70	212.5	141.8
21 Kasumi Mud 2	[14.6]	[5.5]	[15.1]	2.5 9	12.1 0	44.50	95.9	51.4
22 Kasumi Mud 3	(9.5)	(2.5)	(15.4)			31.30	97.1	65.3
23 Kasumi Mud 4	[38.9]*	[25.0]	[27.5]*			48.40	272.2	223.6
24 Kasumi Mud 5	[36.1]	[25.0]	[30.5]	2.5 1	16.0 1	55.50	112.9	57.4
25 Kasumi Mud 6	27.2	17.5	21.3	2.6 1	11.4 8	44.20	102.8	58.6
26 Kasumi Sediment	27.7	24.9	18.8	2.2 8	19.0 0	77.7	324.9	247.2
27 Inbanuma Mud	15.4	9.5	14.5	2.5 1	10.6 4	69.0	206.0	137.0
28 Teganuma Mud	26.6	17.5	22.5	2.3 9	14.2 3	82.7	253.1	170.4
29 Ushikunuma Mud	17.3	11.5	13.1	2.3 6	16.4 1	84.0	208.8	124.8
30 Hinuma Mud	11.8	7.5	11.3	2.5 2	12.7 1	64.9	239.6	174.7
31 Suwako Mud	11.0	7.5	14.0	2.3 5	14.2 6	81.4	232.1	150.6
32 Yunoko Mud	16.5	4.0	30.1	2.0 8	13.6 9	96.4	250.6	154.2
33 Harunako Mud	34.5	25.0	28.3	2.3 5	15.1 1	81.4	150.7	69.0
34 Nakagawa Mud	47.8	15.0	119.6	2.9 3	11.4 2	39.3	119.6	80.3
35 Dojimagawa Mud	60.6	40.0	59.2	2.6 3	7.6 6	33.9	59.2	25.3
36 Tosaborigawa Mud	47.6	30.0	68.7	2.5 5	6.8 9	46.2	68.7	22.5
37 Shonagawa Sand 1	169.0	150	33.31	2.7 5	1.0 3	-	-	-
38 Shonagawa Sand 2	524.0	400	344.1	2.7 3	0.8 1	-	-	-
39 Neyagawa Sand	666.0	540	644	2.0 5	1.9 5	-	-	-
40 Tagonoura Sand	195.0	100	236.06	2.9 5	2.8 7	-	-	-

連続可変条件を任意に設定できることである。今回の実験では、ローターの回転数をゼロから一定加速度で加速させ1分間で最大回転数 64 rpm に至り、再び一定加速度で減少させ次の1分間でゼロになるよう設定した。所定の含水比に調整した試料を、外筒に所定量入れ、泥温を一定にして測定する。各実験ごとに、原則として3回の測定を行った。

3. 実験結果

a) 基本的物性¹⁾ 試験を行った底泥および粘土の種類と各種物性、すなわち、平均粒径 d_m 、中央粒径 d_{50} 、粒度分布の標準偏差 σ_a 、比重 G_s 、灼熱減量比 $v. s. s.$ 、塑性限界 w_p 、液性限界 w_L および塑性指数 I_p を Table 1 に示す。表中、() 内の値はアンドレアゼン・ピベットによる結果であり、*印の付いた d_m と σ_a の値は 50~100 μm の間の分布を一様と仮定して求めたものである。底泥は、ほとんどが細粒土に分類される粒度をもち、中央粒径<平均粒径 \approx 標準偏差という特性を示す。湖沼泥の平均粒径は 10~30 μm の値を示した。また粘土に澱粉を混入させても粒度はほとんど変化しないが、寒天を混入させると平均粒径は約 40 μm とかなり大きくなる。

湖沼泥の比重は 2.1~2.5 程度、灼熱減量比は 10~20% 程度であり、両者には負の相関が認められるが、これは粘土鉱物の比重が 2.6~3.0 であるのに対し、有機物の比重が 1.2~1.7 であるためと考えられる。河口泥の灼熱減量比は 7~11% となり、砂質土では 3% 以下となった。

純粹粘土の液性限界はモンモリロナイト>ベントナイト>カオリナイトの順となる。澱粉含有により液性限界、塑性指数はともに若干低下する。一方、寒天含有により液性限界、塑性指数はともに 100~280% 程度増大し寒天含有率が多いものほど大きい。霞ヶ浦底泥では有機物除去により液性限界、塑性指数とも大幅に減少した。湖沼泥の液性限界はほとんど 200% 以上であり、塑性指数も 120~170% と高い。対象としたすべての底泥が、 $I_p=0.73(w_L-20)$ で定義される A-line 近傍に存在した。全般的に、液性限界および塑性指数の高い底泥は、灼熱減量比が高く比重が低い傾向が認められた。

b) 限界掃流力²⁾ 底泥の流送実験の結果から、底泥の流送に関しては 2 つの限界掃流力の定義を提案する。1 つは流送限界 τ_{c1} であり、もう 1 つは破壊限界 τ_{c2} である。前者は、底泥粒子が浮上し始める限界であり、現象的には砂粒の限界掃流力に対応するものである。後者は、底泥床面が破壊して大量の底泥が短時間に流送されてしまう限界である。従来の研究者が求めた限界掃流力の大部分は、ここで定義した流送限界に対応するもの

である。流送限界以上の掃流力で底泥粒子は飛び出す、せん断応力が破壊限界値近くになるまでは大した河床低下はない。

各底泥に対する流送限界 τ_{c1} および破壊限界 τ_{c2} と含水比 w の関係を Fig. 1, Fig. 2 に示す。破壊限界値は流送限界値より大きいとその差は含水比の増加とともに小さくなる傾向がある。同一含水比条件でも、底泥によって流送限界および破壊限界の値が異なることがわかる。湖沼泥は河口泥に比して、流送限界および破壊限界ともかなり大きくなっている。これは、湖沼泥の方が粒度が小さく有機物が多いために、粘着力が大きいためと考えられる。化学的処理を行った Kasumi Mud 2~6 はいずれも流送限界および破壊限界とも河口泥と同程度まで低下し、底泥中の有機物が底泥の流送抵抗力に大きく寄与していることが明らかとなった。しかし、すべての有機物が流送抵抗力を増大させるわけではない。澱粉および寒天含有（試料番号 1~18）の結果からは、粘土の流送抵抗力は澱粉の含有率が増加するとともに低下し、寒天

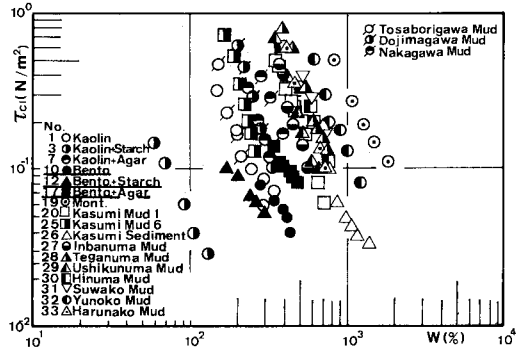


Fig.1 Dependence of critical shear stress on water content.

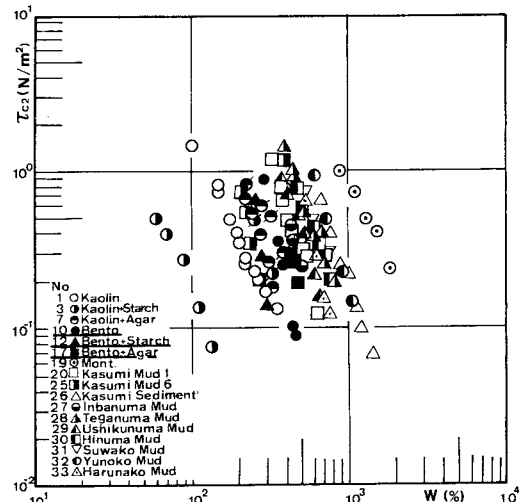


Fig.2 Dependence of critical shear stress on water content.

の含有率が増加するとともに増大する傾向が認められた。なお、試料番号 No. 37~40 の試料には、砂粒の限界掃流力公式が適用された。Fig.1 および Fig.2 から、底泥の流送限界および破壊限界の値は含水比の増加とともに低下することがわかる。これが、含水比が高く飽和状態にある底泥の限界掃流力の特徴である。不飽和土の場合は、そうとは限らないことが Winterkorn³⁾ や Grissinger⁴⁾ によって報告されている。

c) 底泥の流送形態 底泥が水流により浮上・流送されるときに観察される底泥粒子の運動や河床変形などをひとまとめにして、底泥の流送形態とよぶことにする。

観察の結果、今回対象とした底泥の流送形態は2つのグループに分類できた。グループ名を第一底泥グループおよび第二底泥グループとすると、カオリン主成分粘土、湖沼泥および河口泥は前者に、ベントナイト主成分粘土は後者に分類された。2つの底泥グループの流送形態の特徴を模式的に Fig.3 に示す。(a) は第一底泥グループの場合、(b) は第二底泥グループの場合である^{注1)}。横軸は粘度 η が指標である。縦軸はせん断応力 τ および観察された特徴的な現象であり、原則的にせん断応力の増加に伴って現われた順に整理され、現象が顕著なほど帯の幅は太く斜線間隔は狭くしてある。第一底泥グループの特徴的な現象は、底泥表層と水との境界面が明瞭なこと、破壊する少し前に流れ方向に直角な亀裂が現われることである。第二底泥グループの流送形態の特徴は、

底泥表層と水との境界面が不鮮明でもや状の層があること、いかなる場合も河床に亀裂やひびが生じなかったことである。

有機物を含有させた影響としては、澱粉含有により延性が増し変形しやすくなり、寒天含有により変形しにくく塊状ではがれやすくなった。

底泥の流送形態について代表的なものを Photo 1 に示す。一連の写真は、せん断応力の増加に伴う河床状態の変化を示す。番号の若い方から順にせん断応力が増加してい

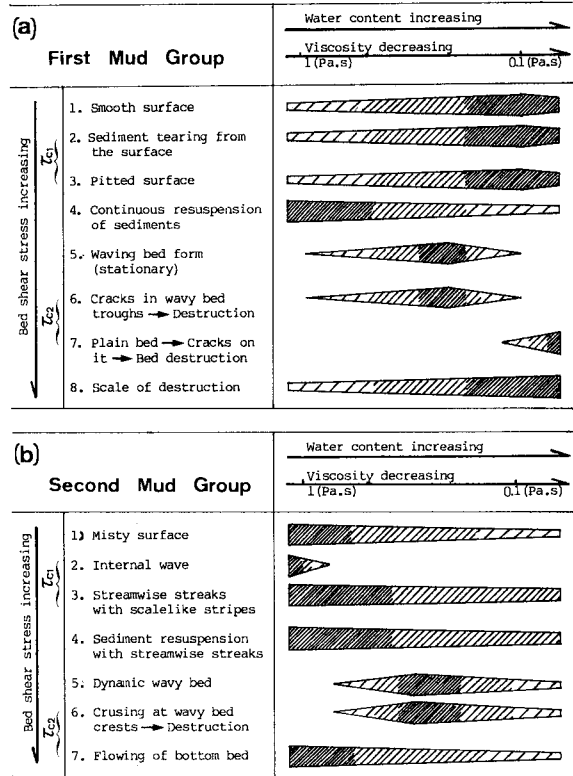


Fig.3 Schematic explanation of resuspensional behaviors of bottom sediments.

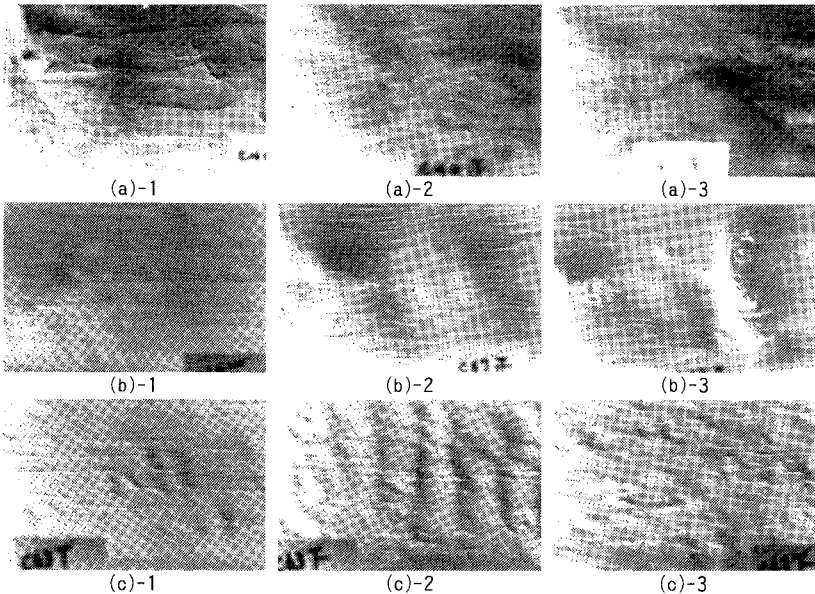


Photo 1 Representative resuspensional behaviors of bottom sediment and clays.

(a) : Kasumigaura Mud 1 $w=530\%$, (b) : Bentonite containing starch (10%) $w=230\%$, (c) : Bentonite with high water content $w=440\%$. As the numbers below the photographs increase, the bottom shear stress increases.

注1) 以下の図や表において、第二底泥グループの試料名にはアンダーラインを入れ、記号は●、▲、■を用いる。

る。(a)は Kasumi Mud 1 の場合であり、第一底泥グループの代表的な流送形態である。せん断応力の増加とともに底泥粒子の浮上が活発になり、全域にわたり波長 8~10 cm、波高 2~5 mm の波状河床が形成された。その後波状河床の trough 部に亀裂が生じ、その部分から破壊が進行していった。(b)は澱粉含有ベントナイト(含有率 10%) の場合である。最初河床面にもや状の縦縞が現われ、せん断応力の増加とともに波長 5~10 cm、波高 2~3 mm 程度の波状河床が形成され、その後 crest 部が押しつぶされるように破壊した。これが第二底泥グループの代表的な流送形態である。(c)は高含水比のベントナイトの場合で内部波が認められた。

d) 沈降特性⁵⁾ 土粒子懸濁体の沈降過程において、懸濁粒子が全体にわたる構造をもつような場合には沈降粒子上端に沈降面(界面)が現われ、安定な単分散のような場合には沈降筒下部に沈積面が現われる。前者は界面(凝集)沈降、後者は自由沈降とよばれる。

まず沈降形態を 2つの底泥グループと対応づけて述べる。Table 2 は底泥の沈降形態を初期含水比 w_0 (初期濃度 c_0 とは一義的關係がある。) によって分類したものである。初期含水比条件は表中の◎、○および*印の位置で示される。沈降形態には初期高さ H_0 の影響は現われなかった。◎印は、実験開始から終了時まで界面も沈積面も現われない場合で、最終状態での含水比も鉛直方向に変化していなかった。○印は、界面が現われそれが時間とともに低下した場合である。*印は粒径の大きいものが沈降して沈積面を形成し、その高さがゆっくり増加したものである。この場合、沈積面の上部に高濃度の懸濁液が存在した。初期含水比 w_0 が同じでも第一底泥グループに属する底泥は界面沈降を呈し、第二底泥グ

ループに属する底泥は自由沈降を呈した。沈降形態においても 2つの底泥グループが明確に分類されることがわかる。

Fig. 4 は初期含水比 $H_0=230$ mm での、最終沈降体積比 H_{∞}/H_0 と初期含水比 w_0 の関係(両対数紙上)である。各底泥とも式(1)の關係が認められるが、 w_0 が同じ条件でも底泥の種類により H_{∞}/H_0 の値は異なる。

$$H_{\infty}/H_0 \propto w_0^{4/5} \dots \dots \dots (1)$$

e) 流動曲線⁶⁾ ここでは、底泥の流動曲線の特徴を 2つの底泥グループと対応づけて述べる。底泥の浮上現象と関連づけて考えるためには、底泥が静止状態から流動状態へ移行する場合の流動特性が重要となるので、ずり速度の増加する場合を研究対象とした。Fig. 5 は測定された流動曲線の典型的なものの模式図である。流動曲線を求めた底泥の試料と測定した含水比の範囲を Table 3 に示す。表中の記号は後述する流動曲線の型を示す。底泥試料番号 3, 7, 12, 17 の粘土の有機物含有率はすべて 10% である。

Type A が最もよく測定された型である。その特徴は、降伏値の存在と、流動曲線があるずり速度 $\dot{\gamma}_A$ で急に折れ曲がることである。Type B の流動曲線は、本来ベキ法則が成立するもので τ_{y1} は定義できない。Type C はダイレタント流体とよばれ、低含水比の澱粉含有カオリナイトのみにみられた。各タイプの流動曲線について粘度 η_1, η_2 および降伏値 τ_{y1}, τ_{y2} を Fig. 5 のように定義した。容器壁面でのスリップ現象について言及した研究⁷⁾ もあるが、流動開始後に降伏値が測定できたこと、底泥の濃度が高く何らかの連結構造を有し、さらにずり速度が小さいため、遠心効果と思われる薄い水の層は観察さ

Table 2 Classification of settling form.

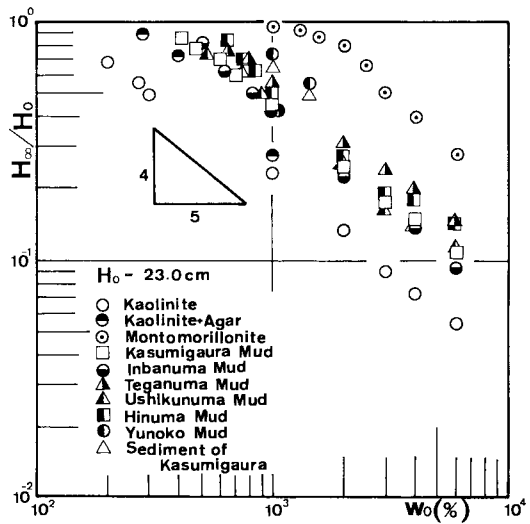
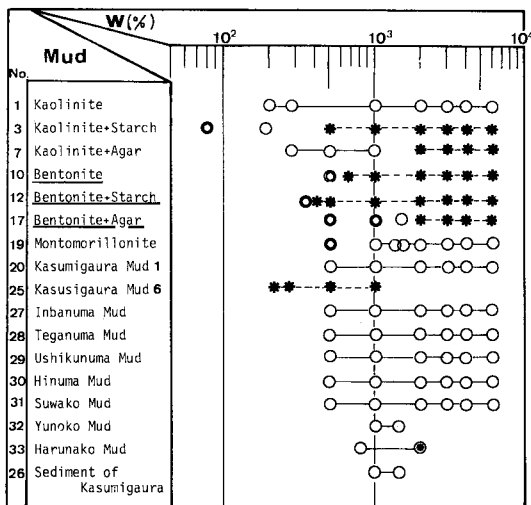


Fig. 4 Dependence of volume ratio at final settling stage versus initial water content.

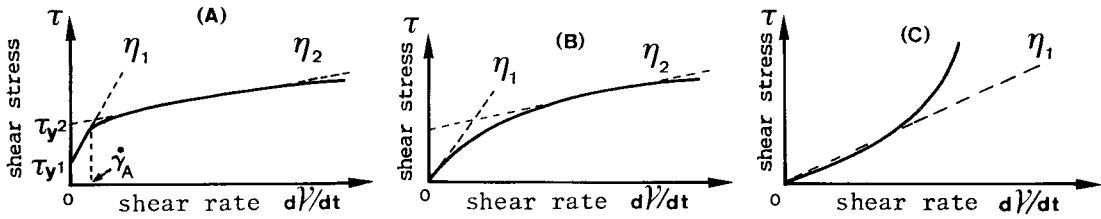


Fig. 5 Definition sketch of viscosity and yield value.

Table 3 Classification of flow curves.

	w (%)	10 ²	10 ³	10 ⁴
1 Kaolinite		A	E	E E E E
3 Kaolinite + Starch		C	D	
7 Kaolinite + Agar		A		
10 Bentonite		B	D D D D	
12 Bentonite + Starch		B		
17 Bentonite + Agar		B		
19 Montomorphillonite		A	A A A E	
20 Kasumi Mud 1		A	E E E E	
25 Kasumi Mud 6		A		
26 Kasumi Sediment		A		
27 Inbanuma Mud		A	E E E E	
28 Teganuma Mud		A	E E E E	
29 Ushikunuma Mud		A	E E E E	
30 Hinuma Mud		A	E E E E	
31 Suwako Mud		A	E E E E	
32 Yunoko Mud		A		

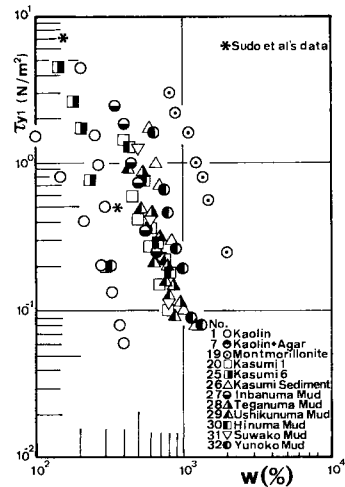


Fig. 7 Dependence of yield value on water content.

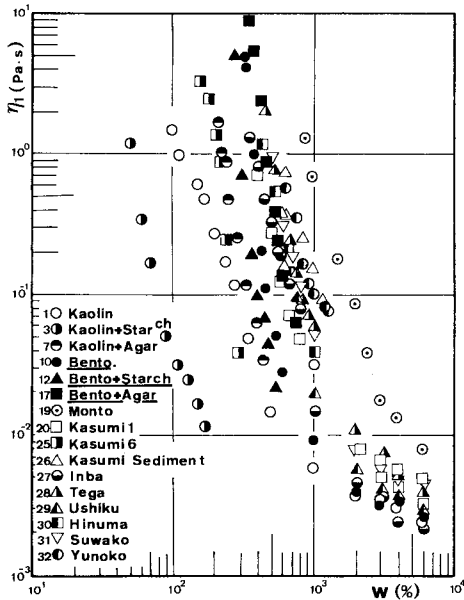


Fig. 6 Dependence of viscosity on water content.

れなかったことなどからスリップは無視できると判断した。各底泥の流動曲線は Table 3 のように分類された。表中 A, B, C はそれぞれ Fig. 5 の Type A, B, C の流動曲線に対応する。D はニュートン流体を、E は高含水比のため $\tau_{y1} = 0$ および $\eta_1 = \eta_2$ となるが、チキントロピー性は示した場合である。表中、矢印で示される範囲

は、流送実験を行った含水比範囲を示す。Table 3 から底泥は流動曲線の特徴からも 2 つのグループに大別され、Type A の流動曲線は第一底泥グループの底泥に、Type B の流動曲線は第二底泥グループの底泥に現われた。澱粉含有カオリナイトはどちらのグループにも分類されなかった。

Fig. 6 は粘度 η_1 と含水比 w との関係を示したものである。各底泥とも含水比の増加に伴い粘度 η_1 は減少する。しかし、同一含水比でも底泥によって η_1 の値が異なる。全般的な傾向として液性限界値が大きい底泥ほど同一含水比条件での η_1 は大きく、含水比の増加分 Δw に対する η_1 の減少分 $\Delta \eta_1$ も小さい。

含有有機物の影響としては、カオリナイトおよびベントナイトとも η_1 は澱粉含有により減少し、寒天含有により増加する。寒天含有土と澱粉含有土で流送形態が異なり、前者のコンシステンシー指数、限界掃流力および粘度の値が後者の値より高くなったが、これは寒天は腰が強いが粘りが弱い、澱粉は腰は弱い粘りが強いという性質が反映したものと考えられる。

Fig. 7 は降伏値 τ_{y1} と含水比 w の関係である。降伏値も粘度の場合と同様に、含水比が高くなると低下する。Fig. 6 および Fig. 7 の実験結果から、粘度や降伏値は含

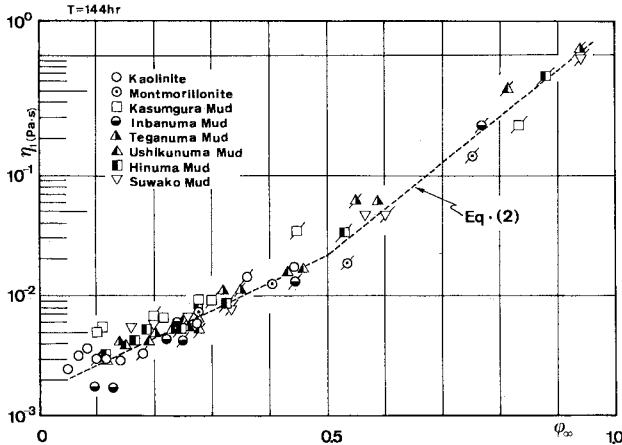


Fig. 8 Relation between viscosity and volume ratio at final settling stage.

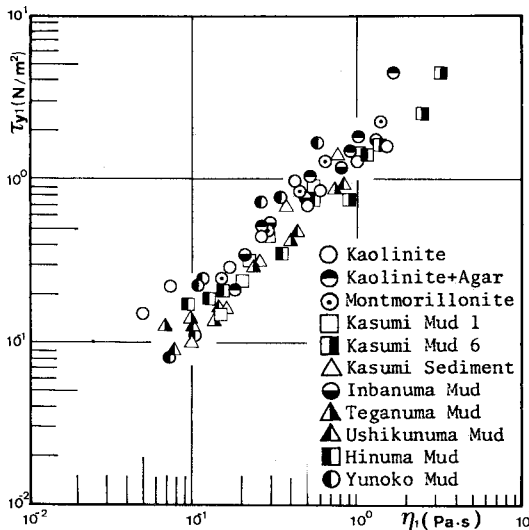


Fig. 9 Relation between viscosity and yield value.

水比では一義的に決まらないことがわかる。

高濃度懸濁液の粘度を与える式としては森・乙竹の半理論式が知られている⁸⁾。その式が想定している状態とは、見掛け粒子にせよ実質粒子にせよ、それらがばらばらになっている状態である。しかし、底泥が粘度 η_1 を示す含水比状態では、底泥粒子は何かの構造によってつながっていると考えられるので、その半理論式を今回の実験結果に適用するのは問題があると思われる。

Fig. 8 は粘度 η_1 と最終沈降体積比 $\phi_\infty (=H_\infty/H_0)$ との関係である^{1), 9)}。実験的には η_1 は ϕ_∞ によって規定できると考えられるが、現時点ではその関係を理論的に導くまでには至っていない。ここでは、実用性を考慮して次式で η_1 と ϕ_∞ の関係を近似した。

$$\begin{aligned} \log \eta_1 &= 3.85 \phi_\infty - 3.6 & 0.5 < \phi_\infty < 0.95 \\ \log \eta_1 &= 2.30 \phi_\infty - 2.8 & 0.05 < \phi_\infty < 0.5 \end{aligned} \quad \dots\dots (2)$$

ここで η_1 は Pa·s の単位であり、 ϕ_∞ は無次元である。

土壌ペーストの降伏値に関しては、安富・須藤¹⁰⁾、大垣ら⁹⁾の研究があるが降伏値を定式化するまでには至っていない。Fig. 9 は降伏値 τ_{y1} と粘度 η_1 の関係を示したものである。若干のばらつきはあるが、

$$\tau_{y1} = A_1 \eta_1^{\alpha_1} \quad (A_1 = 1.5, \alpha_1 = 0.93) \quad \dots\dots (3)$$

の関係が認められる。Fig. 8 と Fig. 9 の結果を考え合わせると、 η_1 のみならず τ_{y1} も ϕ_∞ と一義的に結び付くことがわかる。Michaels and Bogler¹¹⁾ も、堆積構造が同種の物質の場合には物質の種類によらず τ_{y1} と ϕ_∞ に一定の関係

を得たと報告している。 τ_{y1} と η_1 がともに w ではなく ϕ_∞ と結び付くという実験事実は、 ϕ_∞ が懸濁液中の粒子の影響範囲を示す 1 つの指標で一種の有効濃度と考えられる。Fig. 4 で示したように ϕ_∞ は w_0 とは直接結び付かない。 ϕ_∞ は η_1 や τ_{y1} と同様に底泥懸濁体のマイクロレベルでの粒子と空隙の関係、粒子と水の相互作用などの性質をマクロレベルで反映した指標の 1 つと考えられる。マイクロレベルで見れば ϕ_∞ 、 η_1 、 τ_{y1} は同じ起源から派生した性質であるため、沈降実験で得られた ϕ_∞ が等しい場合に、底泥はその種類・粒度分布・粒子形状および比重等に左右されず同一の η_1 と τ_{y1} をもつものと考えられる。しかし、厳密に言えば ϕ_∞ には有効濃度のほかに自重圧密の影響が反映している。

4. 2つの底泥グループの特徴とその要因

これまでの考察により、底泥は基本的物性では 2 つのグループに分類されることはないが、流送形態、沈降特性および流動特性では 2 つの底泥グループに分類されることがわかった。Table 4 は 2 つの底泥グループの各性質の特徴を整理したものである。これらを総合すると、第一グループの底泥は、高含水比では不安定で凝集しやすく、低含水比では降伏値をもつなど脆性強度は発揮するが延性は乏しく小さな変形量で破断する。第二グループの底泥は、高含水比では安定で分散しやすく、低含水比では脆性強度はないが延性をもち変形量大きい。これらの諸性質を規定する要因を沈降特性を中心に検討し、カオリナイト、ベントナイトおよびモンモリロナイトを用いて実証する。これらの粘土は組成が明確で、さらに有機物等による複雑な影響を無視できるので、土粒子の表面状態の考察が単純化される。

底泥の沈降特性は、土粒子の分散・凝集作用に支配さ

Table 4 Characteristics of two bottom sediments groups.

	第一底泥グループ	第二底泥グループ
底泥の種類	<ul style="list-style-type: none"> ・カオリナイト主成分粘土 ・モンモリロナイト ・現地泥 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイト主成分粘土
吸着陽イオン	Al^{3+} , Ca^{2+} , H^+	Na^+
沈降形態	<ul style="list-style-type: none"> ・界面沈降（沈降粒子層と清澄層の間に明瞭な界面が形成される） 	<ul style="list-style-type: none"> ・自由沈降（大きな粒子は独立に沈降し沈積面を形成する。微細粒子は長時間水中に懸濁する）
流動曲線	<ul style="list-style-type: none"> ・降伏値 τ_{01} の存在 ・流動曲線の折れ曲り 	<ul style="list-style-type: none"> ・降伏値なし ・滑らかな流動曲線（ベキ法則）
流送特性	<ul style="list-style-type: none"> ・水との明確な境界面 ・ヒビや亀裂の発生 ・波状河床が形成された場合、波状の谷部にヒビが生じて破壊 ・河床全体の流動なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・水との境界面はモヤ状 ・ヒビや亀裂は発生しない ・波状河床が形成された場合、波状の山部が押し潰されて破壊 ・河床全体が流動

れている。粘土粒子が溶液に接すると、電気二重層を形成する。これをミセルといい、1つ1つのミセルは電気的に中性である。土粒子の分散・凝集はDLVO理論によって説明される¹²⁾。電気二重層が厚いと安定な分散状態が表現される。電気二重層が厚くなる条件としては、次の4つが考えられる。①土粒子の陽イオン交換容量（CEC）が大きい。②吸着陽イオンの解離度が大きい。③溶液中の電解質が一価の陽イオンをもち、その濃度が低い。④溶液がアルカリ性である。これらの知見をもとに、3つの粘土の間で沈降形態が異なる理由を考える。カオリナイトとモンモリロナイトでは粘土鉱物の構造が違うため陽イオン交換容量が大幅に異なり、最終状態での界面高さは異なるが、界面が現われる点では両者の沈降形態は同じである。一方、ベントナイトはモンモリロナイトの不純物で両者の粘土鉱物の構造や陽イオン交換容量はほとんど同じであるにもかかわらず、ベントナイトの沈降形態は沈積面とその上部の高濃度の懸濁体の特徴で、前二者とは沈降形態が異なる。また溶媒としては蒸留水を用いたので、溶媒の影響はないと考えられる。以上のことから3つの粘土で沈降形態が異なったのは、陽イオン交換容量や粘土鉱物自体の構造が直接の原因ではなく吸着陽イオンの違いが原因と考えられる。電気二重層が厚くなる吸着陽イオンの順位は、一般に $Li^+ > Na^+ > [H^+] > K^+ > NH_4^+ > Mg^{2+} > [H^+] > Ca^{2+} > Ba^{2+} > Al^{3+}$ である。H⁺の順位には2つの説がある^{13), 14)}。

3つの粘土の吸着陽イオンの種類と量はプラズマ発光分光分析装置（ICP）による分析結果から推定した¹⁾。

カオリナイトではCECのうち約75%がAl³⁺およびCa²⁺で、ベントナイトでは定量総和の91.5 me/100gのうち75%がNa⁺で、またモンモリロナイトでは90%近くがH⁺で占められていることがわかった。カオリナイトとモンモリロナイトが界面を形成したのは、粘土表面にCa²⁺、Al³⁺およびH⁺が吸着しているためであり、ベントナイトで微細粒子の分散系が現われたのはNa⁺が吸着しているためであると考えられる。これを確認するために、粘土の吸着陽イオンを置換して沈降形態の変化を調べた。カオリナイトおよびモンモリロナイトはNa⁺に置換し、ベントナイトはCa²⁺に置換した。その結果、Na⁺-カオリナイトとNa⁺-モンモリロナイトには沈積面と微細粒子の分散系が現われ、Ca²⁺-ベントナイトには界面が現われて吸着陽イオンの置換により3つの粘土で沈降形態が入れ替わった。また流動曲線も吸着陽イオンの置換によりその曲線の特徴が入れ替わり、底泥の諸性質が吸着陽イオンに大きく支配されるという推論を支持する結果となった⁵⁾。しかし、現地泥には腐植酸等の有機物が含まれており、陽イオンがこれらのキレート物質に結合されるため、底泥の諸性質に及ぼす吸着陽イオンの影響は粘度の場合のように単純でない場合もある。

対象となる底泥がどちらのグループに属するかは、その底泥の沈降形態もしくは流動曲線から推定することができる。しかし、今回対象とした現地泥がすべて第一底泥グループに分類できることから、通常現地泥で細粒土に分類されるものは、ほとんどが第一底泥グループに属すると考えられる。

5. 底泥の限界掃流力に関する実験式

これまでに明らかにされてきた結果をもとに、限界掃流力の実験結果を見直すことにする。底泥の浮上現象は、河床に静止している底泥粒子が流れから力を受けて動き出す現象なので底泥の流動特性と深い関係があると考えられる。浮上する際には底泥のずりもずり速度も小さいため、その範囲の流動特性が必要となる。この条件に適合するのが粘度 η と降伏値 τ_{01} であり、これらの値と2つの限界掃流力との関係を検討した。Fig. 10およびFig. 11はそれぞれ流送限界および破壊限界と粘度との関係を示したものである。各底泥グループごとに粘度 η との間に一義的な関係が認められる。各底泥グループごとの両限界値と粘度との関係式は次のようである。

流送限界

$$\text{第一底泥グループ} \quad \tau_{c1} = 0.35 \eta^{0.6} \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{第二底泥グループ} \quad \tau_{c1} = 0.07 \eta^{0.23} \dots \dots \dots (5)$$

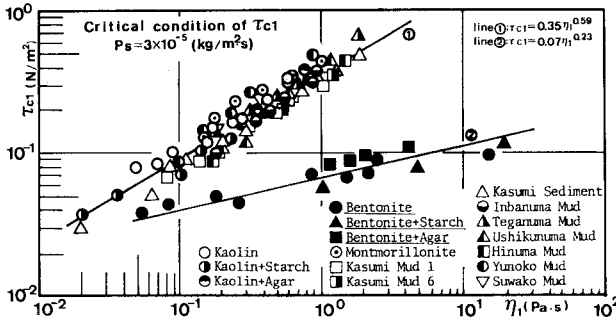


Fig. 10 Dependence of critical shear stress τ_{c1} on viscosity η_1 .

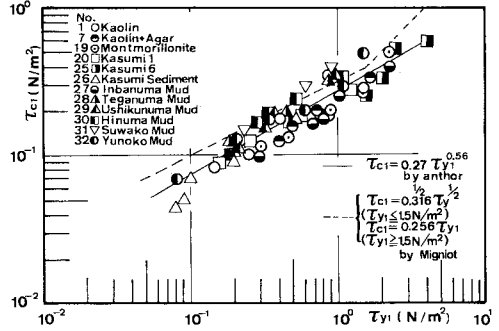


Fig. 12 Dependence of critical shear stress τ_{c1} on yield value τ_{y1} .

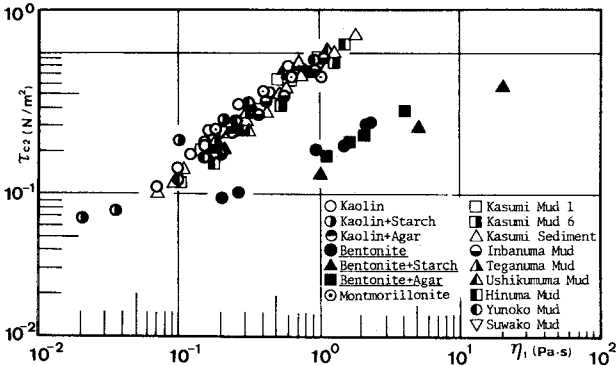


Fig. 11 Dependence of critical shear stress τ_{c2} on viscosity η_1 .

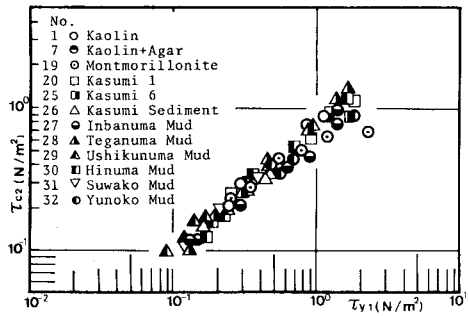


Fig. 13 Dependence of critical shear stress τ_{c2} on yield value τ_{y1} .

破壊限界

第一底泥グループ $\tau_{c2} = 0.92 \eta_1^{0.85}$(6)

第二底泥グループ $\tau_{c2} = 0.20 \eta_1^{0.46}$(7)

ここで τ_{c1} , τ_{c2} の単位は N/m^2 であり, η_1 の単位は $Pa \cdot s$ である. また両式の適用範囲は第一底泥グループの場合 $0.05 < \eta_1 (Pa \cdot s) < 4$ であり, 第二底泥グループの場合 $0.1 < \eta_1 (Pa \cdot s) < 20$ である. 両限界値とも, η_1 が $0.05 Pa \cdot s$ 以下になると底泥グループの差がなくなる. 式(4)~式(7)の関係は実験的なものではあるが, 底泥の種類が異なっても粘度 η_1 が同一であれば両限界値が同じになることを示す.

さらに, 第一底泥グループについては, 2つの限界掃流力と降伏値 τ_{y1} の間にも一定の関係が認められた.

Fig. 12 に流送限界と降伏値, Fig. 13 に破壊限界と降伏値との関係を示す. Fig. 12 には, Migniot¹⁵⁾ によって得られた限界掃流力と降伏値の実験式も併示してある. Migniot の限界状態の定義は著者と同様のものであり, 今回の実験範囲では, Migniot の実験式は流送限界に対してかなりよい近似式となっている. この良好な対応関係は, 両者の実験結果を相互に検証した形となった. 両限界値に対して次の実験の関係が導かれる.

流送限界 $\tau_{c1} = 0.27 \tau_{y1}^{0.56}$(8)

破壊限界 $\tau_{c2} = 0.79 \tau_{y1}^{0.94}$(9)

式(9)より, 第一底泥グループの底泥の破壊限界 τ は降伏値 τ_{y1} にはほぼ正比例し, さらに値自体もほぼ等しいことがわかる. 実験結果も流送限界 τ_{c1} と降伏値との関係よりばらつきが少ない. 既往の研究のほとんどは, 底泥の限界掃流力として流送限界に対する状態を考えているが, 著者らはここで第一底泥グループの限界掃流力として破壊限界を考えることを提案する. 破壊限界が降伏値より若干小さめとなる理由としては次のことが考えられる. ①降伏値は底泥の内部構造の平均的な強度を示す量であるのに対して, 破壊限界値は底泥の内部構造の弱い箇所や表面の凹凸や固定床との接続部分などの応力の集中した箇所の挙動を反映したものになりやすい. ②これらの箇所は底泥面の他の箇所より破壊しやすく, 他の箇所が破壊に至らないような流れの平均せん断応力によっても破壊する. 従来の研究は低含水比条件のものが多く, 降伏値が限界掃流力より非常に大きいという結果が指摘されてきたが, これは降伏値としてビンガム降伏値 (Fig. 5 (a) の τ_{y2} に相当) を用い, 限界掃流力として流送限界 τ_{c1} を用いているためと考えられる^{16)~18)}. 著者の実験でも, 粘度 η_1 が大きくなり $1 Pa \cdot s$ 程度になると, $\tau_{y2} \gg \tau_{y1} \gg \tau_{c1}$ の結果が得られた. 流送限界状態は現象的には砂粒の移動限界状態に近いが, 粘度 η_1 の増加とともに $\tau_{y1} \gg \tau_{c1}$ となり, 現状では流送限界 τ_{c1} を規定

できる流送抵抗力が見当たらない。流送限界状態は、流れのせん断応力が平均的には $\tau < \tau_c$ にもかかわらず、せん断応力の変動のため瞬間値としては $\tau > \tau_c$ の状態が起こり、そのときに飛び出す底泥粒子の量が無視できなくなる状態と解釈される。すなわち、流送限界は底泥の運動方程式に基づいた初期移動機構を検討することによって評価される性質のものと考えられる。このような観点から実験結果を見直すと、飛び出し量 P_s が約 $3.0 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ となる状態でのせん断応力を流送限界 τ_{cl} として整理していたことがわかった。

限界掃流力を降伏値と関係づける議論は、降伏値の存在する第一底泥グループのみに適用できるものであって、 Na^+ -ベントナイトのような降伏値が現われない第二底泥グループには適用できない。このグループの場合静的つり合い条件としての抵抗力は重力抵抗が主要因と考えられ、Fig. 10 において η_l が増加しても τ_{cl} があまり増加しないという実験結果もこれを裏付けている。このグループの底泥の界面は不鮮明で界面近傍での粘度は底泥層内部とはかなり異なると考えられ、限界状態を考察するに際しては底泥と上層水の界面近傍の状態の解明が必要となるが、実験的には式 (5) および式 (7) で流送限界および破壊限界が規定できる。

以上、底泥の限界掃流力を粘度 η_l や降伏値 τ_{y1} と結びつけることができたが、 η_l および τ_{y1} を理論的に求めることは現時点では不可能である。また η_l および τ_{y1} を測定するためには特殊な機能を有する粘度計が必要で一般的には困難である。しかし、第一底泥グループについては η_l および τ_{y1} の値は間接的な方法である程度評価できる。限界掃流力を推定したい底泥の含水比を w_u とすると、 w_u の初期含水比で沈降実験を行って最終沈降体積比 ϕ_w を求める。その ϕ_w に対して Fig. 8 および Fig. 9 から η_l と τ_{y1} を推定する方法である。

6. 結 論

本研究では、底泥の限界掃流力に関して実験的に論じた。底泥の浮上・流送特性に関する研究では、流送抵抗力の評価が非常に難しいこと、現象自体がまだ明らかでないために実験的研究が先行する。流送実験時の観察に基づいて底泥の浮上・流送に対して、流送限界と破壊限界という2つの限界状態を定義し、さらに流送形態の特徴から底泥を2つのグループに分類した。2つに分類された底泥グループは、沈降形態や流動特性においても異なった特徴を示し、その主要因が吸着陽イオンの種類にあることを明らかにした。さらに、流送限界および破壊限界と底泥の粘度との間に一義的な関係があり、その関

係式が2つの底泥グループで異なること、また第一底泥グループの場合には降伏値とも一定の関係があり、流送限界は降伏値の約2分の1乗に比例し、破壊限界はほぼ正比例するという実験的事実を得た。

参 考 文 献

- 1) 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。
- 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論文集，pp.140～146，1980。
- 3) Winterkorn, H. F. : Mechanism of water attack on dry cohesive systems, Soil Science, 54, pp.258～273, 1942.
- 4) Grissinger, E. H. : Resistance of selected clay systems to erosion by water, Water Resources Res., 2, pp.131～138, 1966.
- 5) 大坪国順・村岡浩爾：底泥の沈降特性に関する研究，第27回水理講演会論文集，pp.317～322，1983。
- 6) 大坪国順・村岡浩爾：底泥の物性と限界掃流力の関連について，第25回水理講演会論文集，pp.73～78，1981。
- 7) 楠田哲也・二渡 了・賀賢一・栗谷陽一：改良型同心円筒回転型粘度計による粘土懸濁液の流動特性の測定，衛生工学研究論文集，Vol.21, pp.83～99，1985。
- 8) 森 芳郎・乙竹 直：懸濁液の粘度について，化学工学，20, (9), pp.16～22，1956。
- 9) 大垣真一郎・松尾友矩：高濃度懸濁液の流動特性について，土木学会論文報告集，第210号，pp.21～23，1977。
- 10) 安富六郎・須藤清次：土壌ペーストの流動(II)，農業土木研究別冊，第3号，pp.41～45，1962。
- 11) Michaels, A. S. and Bogler, J. C. B. : The plastic flow behavior of flocculated kaolin suspensions, I & EC Fundamentals, 1, (3), pp.153～162，1962。
- 12) 田丸謙二編：岩波講座 現代化学16 界面の化学，岩波書店，1980。
- 13) 日本粘土工学会編：粘土ハンドブック，技報堂，pp.95～137，1967。
- 14) Yong, R. N and Workentin, B. P. (山内豊聡・竹中肇・前田 隆 監訳)：新編土質工学の基礎，鹿島出版会，1978。
- 15) Migniot, P. C. : Etude des proprietes physiques de differents sediments tres fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques, Houille Blanche, 23, (7), pp.592～620，1968。
- 16) 澤井健二：粘性性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究，京都大学学位論文，1977。
- 17) 栗谷陽一・楠田哲也・海田輝之：底泥の巻き上げに関する基礎的研究，第15回衛生工学研究討論会論文集，pp.21～27，1979。
- 18) 青木美樹・首藤伸夫：粘性土堆積層の洗掘現象に関する実験的研究，第26回水理講演会論文集，pp.82～92，1982。

(1985.2.28・受付)