

柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究

STUDY ON EROSIONAL PROCESS OF SOFT MUDS

海田輝之*・楠田哲也**・二渡 了***・粟谷陽一****

By Teruyuki UMITA, Tetsuya KUSUDA, Tohru FUTAWATARI and Youichi AWAYA

The erosional process of soft muds is studied experimentally and theoretically. Mud erosion is classified to three types according to water content of them. These characteristics are distinguished by the range of the slump value. The erosion tests of soft muds show that the critical shear stress of erosion τ_{ce} is expressed as a function of solid fraction of muds at the surface layer and the initial erosional flux as a function of non-dimensional bed shear stress $\tau/\tau_{ce}-1$. The erosional fluxes at constant shear stresses decrease in an hour after the start of experiment because of the hardening of muds by the shear deformation which accompanies the reorientation of mud particles.

On the basis of these experimental results, a model for the behaviour of muds is developed to simulate the erosional process. This model well describes the changes of suspended solids concentration and vertical distributions of solid fraction in uneroded remaining muds.

Keywords: erosion, muds, suspended solids, critical shear stress

1. 緒 論

河川感潮部, 浅い湾や湖沼には底泥が堆積していることが少なくない。この底泥は潮汐, 洪水, 吹送流等により巻き上げられ, 懸濁物質による濁りの問題を引き起こし, また, 巻き上げに伴い, 底泥に吸着したり底泥間隙水中に含有されていた栄養塩類や重金属類が水中へ移動し, 水域の富栄養化や汚濁の問題を引き起こしている。したがって, これら水域での水質を予測し, さらに, 水域の保全を計るためには, 懸濁物質の移流分散方程式において source 項に相当する底泥の巻き上げの速度を精度よく表示することが必要不可欠である。

底泥の巻き上げに関しては, かなり研究がなされてきた。古くは粘着性土床を有する水路等の安定問題を扱った経験則に基づく研究¹⁾があり, その後, 粘性土や底泥の巻き上げに関する限界せん断応力をそれらの力学的特性(ペーンせん断強度^{2),3)}, ピンガム降伏値^{4),5)}, アッター

ベルグ限界⁶⁾に関連づけた研究, 環境因子として水温⁷⁾⁻⁹⁾, 塩分濃度⁷⁾, SAR (Sodium Absorption Ratio)^{10),11)}を取り上げ, これらが巻き上げに対する限界せん断応力や巻き上げの速度に及ぼす影響を実験的に検討した研究, さらに底面せん断応力の変動を考慮し, 底泥粒子の移動から巻き上げの速度を定式化しようとする研究^{12),13)}, へと発展してきた。しかしながら, 現時点では①底泥は種々の巻き上げ形態を示すにもかかわらず, それらを分類する適当な指標がなく, ②巻き上げ時の底泥の挙動については全く研究されておらず, 巻き上げ現象自体が未解明であり, ③巻き上げ過程を表わす十分なモデルがない, のが現状である。

本研究は以上の観点から, 底泥の種類や含水比を変え種々の底面せん断応力のもとで巻き上げ実験を行い, まず, 簡単なスランプ試験の結果によって巻き上げ形態が分類できることを示す。次に, 比較的柔らかい底泥(この定義は2.で示す)を対象にして巻き上げ実験を行い, 巻き上げ時の底泥の基本的な挙動や懸濁液の濃度と粒度の変化を明らかにする。最後に実験で得られた知見をもとに, 巻き上げ過程を表わすモデルを提案し, このモデルの妥当性を検討する。

2. 底泥の巻き上げ形態の分類

* 正会員 工修 岩手大学助手 工学部土木工学科
(〒020 盛岡市上田 4-3-5)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科
(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

*** 正会員 工修 九州大学助手 工学部水工土木学科
(同上)

**** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科
(同上)

底泥の物理的特性は粒度分布や含有鉱物の種類等が同じでも、含水比によっても大きく異なる。よって、底泥の巻き上げの形態も含水比により変化すると考えられる。滝・岡¹⁴⁾は、底泥の粘性と上層水の流速をパラメーターとして、底泥の巻き上げ形態の両極端が掃流的現象と密度流的現象からなることを示した。また、大坪・村岡¹⁵⁾は自らの定義による破壊限界と流送限界が実用的には粘性係数によって2つに分類できることを示した。これらの結果は底泥の巻き上げ形態が少なくとも2つに分類できることを示唆している。ここでは3種類の試料について巻き上げ形態を観察するとともに、この形態が簡単なスランプ試験値により分類できるかを検討し、本研究で扱う「柔らかな底泥」についての定義を定量化する。

(1) 実験装置および方法

試料として市販カオリン (Engelhard, ASP 600)、筑後川河口部で採取した底泥 (以下筑後泥 I あるいは II と称す)、盛岡市高松池で採取した底泥 (以下高松泥と称す) を用いた。図-1 に各試料の JIS A 1204 による粒度分布を、表-1 に物性値を示す。試料の含水比は並塩で比重を 1.025 に調整した塩水で変化させた。

スランプ試験¹⁵⁾には図-2 に示した鉄製のフローコーン (JIS A 1109) を使い、試験方法は「コンクリートのスランプ試験方法」(JIS A 1101) に準拠した。ただし、フローコーンが小さいため2層に分け、各層について突き棒で15回均等に突いた。その後、コーンを静かに鉛直に引き上げ、試料の中央部においての下がり (mm) をスランプ測定器で測定し、これをスランプ値とした。

巻き上げ試験には長さ6m、幅20cmのアクリル樹脂製循環水路を用い、この水路の水路床が他の部分より低くなっている凹部に含水比を調整した試料を一様に入

れ、通水し、巻き上げの様子を観察した。

(2) 実験結果および考察

カオリン、筑後泥 I、高松泥とも水路床に敷いた時点で拳動および巻き上げの形態は含水比により、以下に示す3つに分類された。

① 含水比が低い場合で、試料を水路床に敷く際、試料は自重では平らにならず、表面をならす必要があった。通水し、せん断応力を増加していくと、流れと垂直方向に局部的に小さなひびわれが生じ、それが成長し、押し流され、引き剥がされるように巻き上げが生じた。このひびわれは底泥の強度の低いところや、底泥表面の凸部のようなせん断応力が集中するところから生じていた。2時間通水しても、巻き上げ量が少ない場合には試料をならした時点で生じた起伏は残存していた。

② ①より含水比が高くなった場合で、試料を水路床に敷く際、試料は起伏を残すことなく自重で平らになった。せん断応力を増加すると底泥表面に流れと平行に長さ5cm、幅2mm程度の筋が多数発生し、これらの筋の峰から巻き上げが開始した。さらに、せん断応力を増加すると峰からの巻き上げが顕著になった。通水2時間後にはリップルが形成されていた。

③ さらに含水比を増加させた場合で、試料は流動性が大きくなった。あるせん断応力に達すると、底泥表層部に界面波が生じ、さらにせん断応力を増加すると界面波の砕波とともに巻き上げが生じた。通水2時間後では②でみられたようなリップルは形成されていなかった。

以上の3種類の巻き上げの形態を含水比 w (%) によって分類すると表-2 のようになる。ただし、ここの分類は必ずしも厳密なものではなく、各領域で①-③に示した現象が支配的になるということを示す。

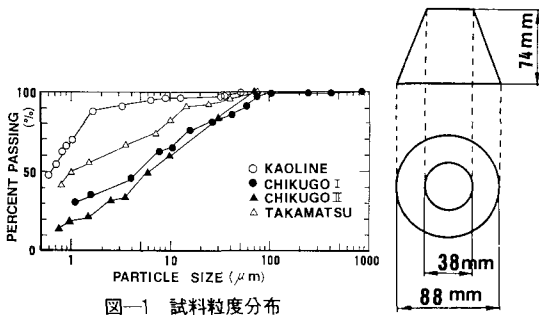


図-1 試料粒度分布

図-2 フローコーン

表-1 試料の物性値

	密度 (t/m ³)	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Ignition Loss (%)
カオリン	2.66	65	36	-
筑後泥 I	2.47	96	42	10.5
筑後泥 II	2.52	99	41	12.0
高松泥	2.51	118	55	12.7

表-2 巻き上げ形態の分類

巻き上げの形態	カオリン	筑後泥 I	高松泥
①	$w < 180$	$w < 200$	$w < 230$
②	$180 < w < 480$	$200 < w < 350$	$230 < w < 350$
③	$480 < w$	$350 < w$	$350 < w$

次に、図-3 にスランプ試験の結果を片対数紙上に示す。縦軸はスランプ値 S とフローコーンの高さ H (74 mm) との比 S/H を示している。 S/H は各試料とも含水比により3つの領域に分けられ、さらに、各領域において直線で近似でき、含水比が高くなるに従って直線の勾配が緩やかになり、高含水比になると変化しなくなっていることがわかる。また、図-3 に示したように w と S との関係は片対数紙上で各領域につき直線で近似できることから、底泥の場合でもコンクリートと同様にスランプ値の変化 dS が含水比 w の変化率 (dw/w) に

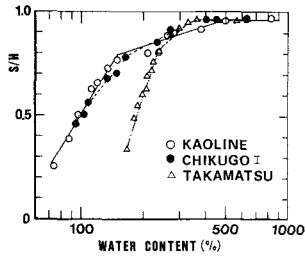


図-3 含水比と比スランプ値の関係

比例する¹⁶⁾ことが認められる。先に示した含水比の相違による巻き上げの形態とこの S/H を対応させると、領域①と②の境界が若干異なるが、

$S/H < 0.8$ のとき 領域①

$0.8 < S/H < 0.95$ のとき 領域②

$0.95 < S/H$ のとき 領域③

となり、巻き上げの形態はスランプ値で比較的良好に整理できることがわかる。スランプ値はコンクリートのコンシステンシーを表わす指標として用いられ、見掛け密度と降伏値によって主に支配される¹⁶⁾。したがって、スランプ値は重力(自重)の影響と試料の強度の双方を含んだ指標と考えられ、その測定方法の簡便さも考慮すると、底泥の巻き上げ形態を表わす指標になり得ると考えられる。本研究で取り扱う柔らかい底泥とは“自重によって表面が平らになるような含水比を有し、本実験装置による比スランプ値が0.8以上のもの”と定義する。

3. 底泥の巻き上げ過程に関する実験

底泥の巻き上げに関しては1.で示したように多くの実験的研究が行われてきた。これらの実験で底泥の初期の状態は、①底泥の鉛直方向に含水比や粒度の分布が存在しない場合(uniform bed)と、②これらが存在する場合(deposited bed)、の2つに分けられる。①の場合には底泥の強度が鉛直方向に変化しないため、一定せん断応力の下では巻き上げの速度が経過時間にかかわらず一定で、②の場合には底泥の強度が下層ほど大きくなるため、巻き上げ速度が経過時間とともに低下すると解釈されてきた¹⁷⁾。しかしながら、本研究で対象とするような柔らかい底泥では巻き上げ時に底泥がせん断応力を受けて、流動し、この流動に伴い底泥の強度等が変化する可能性があるにもかかわらず、巻き上げ時の底泥自体の挙動については何ら情報が得られていないのが現状である。したがって、底泥の巻き上げ現象を解明するためには、巻き上げ後の残留底泥、特に表層部の底泥の種々の物理的性質の変化を明らかにする必要がある。

ここでは以上の観点から、巻き上げられた懸濁物質の濃度と懸濁物質を構成する粒子の粒度変化、巻き上げに伴う底泥の粒度と固体分率の変化、底泥の流動状況と底

泥を構成する粒子群の配向性の変化等に関して詳細な実験を行い、巻き上げ時の底泥の基本的挙動を検討する。

(1) 実験装置および方法

実験は長さ12 m、幅28 cmの循環式アクリル製直線水路と図-4に示した円形回転水路¹⁸⁾を用いて行った。実験試料としては、カオリンおよび筑後泥ⅠとⅡを用いた。おのおのの試料は並塩で比重を1.025に調整した塩水で含水比をあらかじめ調整し、直線水路の場合には水路下流端から2~6 mの区間の路床凹部に、円形回転水路の場合には水路床全体に試料を注入した。試料の厚さはカオリン、筑後泥Ⅱの場合2 cm、筑後泥Ⅰの場合には3.8 cmとした。この時点では底泥の鉛直方向には含水比や粒度の分布がない。その後、直ちに通水を開始し、経時的に採水し、孔径0.1 μm のメンブランフィルターでサンプルをろ過してSS濃度を求めた。

懸濁液および底泥中の粒子の粒度分布は、採水した試料に分散剤として4%のヘキサメタリン酸ナトリウムを加え、超音波破壊器でフロックを壊した後、遠心式粒度分布測定装置(島津製作所製、CP-20)により求めた。

巻き上げられずに水路床に残存する試料の固体分率の鉛直分布は図-5に示した装置を用いて試料を採取後、求めた。この装置はアクリル樹脂製のパイプ(内径5 cm ϕ 、肉厚3 mm)と、このパイプよりもわずかに小さな外径をもつ薄いプラスチック樹脂製の円筒からなっている。まず、パイプの下面にシリコン樹脂の接着剤を塗り、図-5に示した状態でこの装置を底泥中に鉛直に

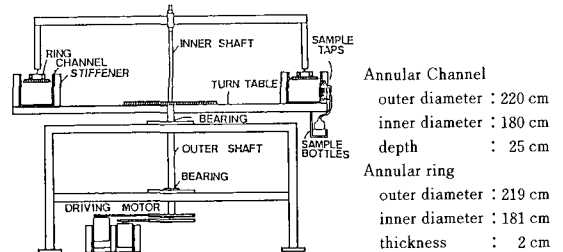


図-4 円形回転水路

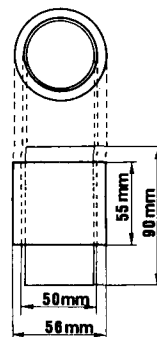


図-5 底泥採取装置
(固体分率測定用)

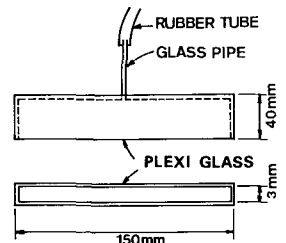


図-6 底泥採取装置
(移動量測定用)

挿入する。挿入時には内側の薄い円筒によって試料をほとんど乱さずに他の底泥と分けることができ、その後、外側のパイプを底面まで押し込みサンプルの流動を防止する。次に、円筒内の底泥を真空ポンプで層状に磁皿に吸い出し、湿潤および乾燥密度から固体分率を算出した。

底泥の移動距離の鉛直分布を求めるため、図-6 に示した装置を考案した。この装置は2枚の薄いプラスチック樹脂板（間隔3mm）とガラスパイプからなり、プラスチック樹脂板は下部とパイプとの接合部を除いて密閉してある。実験開始前に水性白色絵具で試料を着色し（筑後泥Ⅰの場合、薄い灰色になる）、この試料を流れと垂直方向に水路全幅にわたって幅4cmになるよう注入した。他の部分には着色していない試料を注入した。所定の時間に、この装置を試料中の着色部分を跨ぐように、流れと平行に注意深く挿入し、パイプを閉じてからこの装置を底泥中から抜いた。その後、写真撮影から底泥の移動距離の鉛直分布を求めた。

底泥表層近くの粒子群の配向性は透過型電子顕微鏡（日立製作所製、H-800）を用いて求めた^{19),20)}。まず、実験開始前にシリコンを塗布したガラス板を水路凹部に置き、その上から試料を注入した。通水実験終了後、図-5と同様の装置を底泥中に挿入し、ガラス板ごと乱さないように試料を採取した。次に、エタノールで脱水し、スチレンとn-ブチルメタクリレートの2:3混合液に触媒として1%過酸化ベンゾイルを加えたモノマーで包埋した。その後、マイクロームで薄切を行い、コロジオン支持膜を張ったメッシュに試料載物後、カーボン真空蒸着し、2000倍で撮影し、粒子（群）の配向性を測定した。

(2) 実験結果および考察

a) 巻き上げの限界せん断応力

図-7に巻き上げの限界せん断応力 τ_{ce} と固体分率 $(1-\epsilon)\epsilon$: 空隙率（塩水の体積/全体積）との関係を示す。 τ_{ce} は各研究者によりその定義の仕方が異なるが、ここではせん断応力を徐々に大きくしたとき、底泥の表層部のほぼ全域で界面波あるいは筋が発生したときのせん断応力を τ_{ce} と定義した。この τ_{ce} で通水を続けると上層水はかなり濁ってくるようになる。この定義は肉眼による観察に基づいているが、著者らの経験ではほとんど個人誤差は生じなかった。図-7から τ_{ce} と $(1-\epsilon)$ とは両対数紙上で直線関係にあり、

$$\tau_{ce} = \delta_1(1-\epsilon)^n \dots\dots\dots (1)$$

として表わされることがわかる。n の値は各試料とも1.5、 δ_1 の値は筑後泥Ⅰ、Ⅱ、カオリンの場合、おのおの6.2, 4.3, 4.3 [N/m²]となる。また、図中には砂粒の移動の限界せん断応力を与える岩垣式および栗原式で筑後泥Ⅱについて、平均粒径として8 μ mを用いて計算し

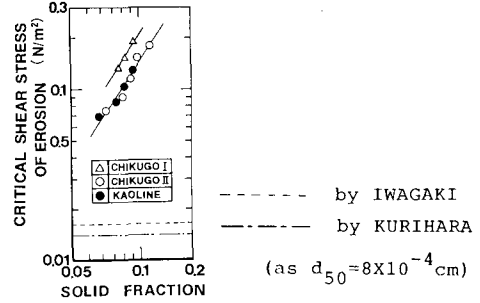


図-7 固体分率と巻き上げの限界せん断応力との関係

た結果も併記している²¹⁾。これらの式では τ_{ce} は固体分率には関係せず、平均粒径が決まれば一義的に決定されることがわかる。また、底泥の場合にはこれらの式から予測される値より大きくなり、重力のほかに凝集力が働いていることを示している。

b) 初期含水比とせん断応力を変化させた場合の底泥の巻き上げ特性

図-8(a), (b) に筑後泥Ⅱ、カオリンについて種々の初期含水比およびせん断応力の下でのSS濃度の経時変化を示す。筑後泥Ⅱで含水比300%、せん断応力0.5 N/m²の場合を除いて実験終了時には水路床に試料が残存していた。また、底泥厚の低下に伴うせん断応力の低下は無視できる程度であった。巻き上げのパターンは、初期の急激な巻き上げ期間とその後の緩やかな巻き上げ期間とに分けられ、時間の経過とともに巻き上げ速度が低下し、1時間程度経過するとSS濃度はほとんど変化しなくなっていることがわかる。また、同一の初期含水比では、せん断応力が大きいほど、同一のせん断応力では初期含水比が高いほど、初期の巻き上げ速度、最終SS値とも大きくなっている。ここで、初期の巻き上げ速度 $E_{t=0}$ を図-8(a), (b) の $t=0$ 分での曲線の勾配から算出し、せん断応力として、実験時のせん断応力 τ から巻き上げの限界せん断応力 τ_{ce} を引いて有効せん断応力を考え、さらにこの有効せん断応力を τ_{ce} で無次元化し、 $(\tau - \tau_{ce})/\tau_{ce}$ とした場合の両者の関係を両対数紙上に示したのが図-9である。同一の $(\tau - \tau_{ce})/\tau_{ce}$ でも試料の種類により $E_{t=0}$ の値は異なるが、各試料につき、

$$E_{t=0} = \delta_2(\tau/\tau_{ce} - 1)^m \dots\dots\dots (2)$$
 として表わされることがわかる。m の値は筑後泥Ⅰ、Ⅱ、カオリンの場合、1.9, 2.3, 2.3、 δ_2 の値は513, 37, 120 [g/m²·min]となる。

次に、SS濃度がほぼ一定の状態になったときについて考える。図-10は試料としてカオリンを用い、直線水路に初期含水比400%、 $\tau=0.272$ N/m²で2時間通水し、その後通水を停止し、直線水路内の循環水を清水と置換し、さらに同じせん断応力で2時間通水したときの

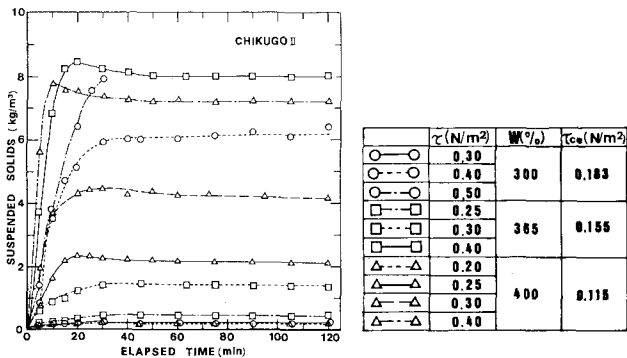


図-8(a) SSの経時変化

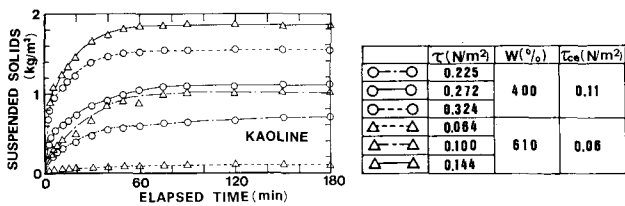


図-8(b) SSの経時変化

SS濃度の経時変化を示したものである。これより、再通水後にはSS濃度の増加がほとんど認められないことがわかる。したがって、SS濃度が変化しない状態は底泥の巻き上げと巻き上げられた懸濁物質の沈降とが平衡状態にあるのではなく、1時間程度通水すれば巻き上げが停止するといえる。

次に、試料としてカオリンを用い、せん断応力を2時間ごとに0.272→0.324→0.4 N/m²と段階的に増加した場合のSS濃度の経時変化を図-11に示す。図-11と図-8(b)を比較すると、段階的にせん断応力を増加させると第2段階以降では、最初から一定のせん断応力の場合に比べ巻き上げ速度、巻き上げ量ともかなり低くなっていることがわかる。一方、図-12はカオリンについて初期含水比400%で、 τ_{ce} 以下のせん断応力である $\tau=0.1$ N/m²で2時間通水後にさらに $\tau=0.4$ N/m²で2時間通水した場合と、2時間静置した後 $\tau=0.4$ N/m²で2時間通水した場合のSS濃度の経時変化を示している。これより巻き上げ過程にはほとんど変化が認められないことがわかる。よって、底泥が τ_{ce} 以上の巻き上げが生じるような先行せん断応力を受けるとその後の巻き上げに何らかの影響を及ぼすと考えられる。これらの原因についてはc, d)で詳しく検討する。

次に、図-8(a), (b)で $t=0$ での初期の勾配を示す直線と一定値としてのSS濃度を示す直線との交点の横座標の値を巻き上げの継続時間 T とし、この T と前に示した無次元せん断応力との関係を両対数紙上に示したのが図-13である。この図より、各試料につき勾配が-1の直線で示され、

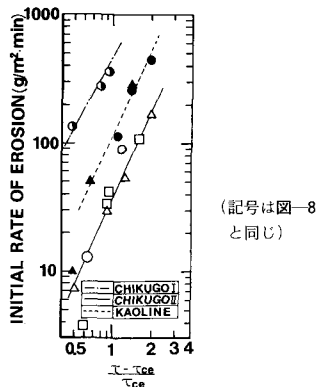


図-9 無次元せん断応力と初期巻き上げ速度の関係

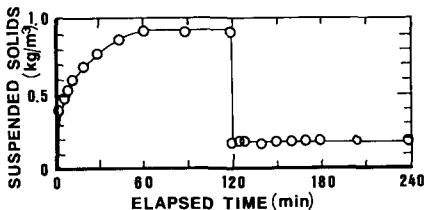


図-10 SSの経時変化 (120分で通水停止後、清水と入れかえ再通水)

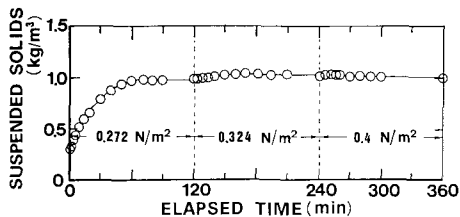


図-11 段階的にせん断応力を増加した場合のSSの経時変化

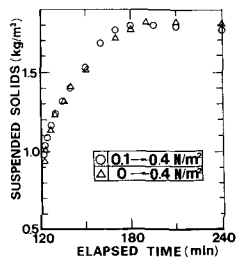


図-12 τ_{ce} 以下の先行せん断応力を受けた場合のSSの経時変化

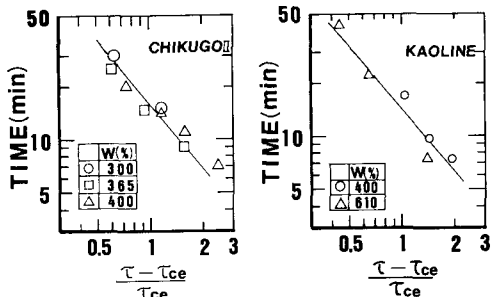


図-13 無次元せん断応力と巻き上げの継続時間との関係

$$T \cdot (\tau - \tau_{ce}) / \tau_{ce} = 13 \quad \text{ただし, } T \text{ の単位は [min]} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わされることがわかる。大坪・村岡は底泥の破壊限界 τ_c と塑性粘度 μ_B との関係をよくの実験から、

$$\tau_c = 0.92 \mu_B^{0.85} \quad \dots\dots\dots (4)$$

を示した⁵⁾。 τ_{ce} と τ_c の定義が若干異なるが、 $\tau_{ce} \cong \tau_c$ とし、式 (4) の μ_B のべき数を 1 とすれば、

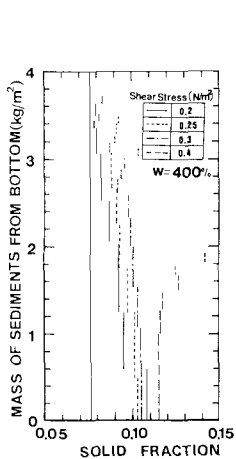
$$(\tau - \tau_{ce}) / \mu_B \sim T^{-1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。式 (5) は同一含水比の場合にはせん断応力が大きいほど、同一のせん断応力の場合には含水比が高い底泥ほど、巻き上げが短時間で終了することを示している。また、急速巻き上げ期の巻き上げ速度として式 (2) を用い、式 (3) より急速巻き上げ期の持続時間を算出すれば、実用的な第 1 次近似として巻き上げ過程を表わし得ることになる。

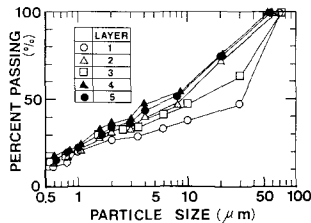
c) 巻き上げ時の残留底泥の粒度と含水比の鉛直方向の分布の変化

b) において、①せん断応力が一定の場合でも 1 時間程度通水すれば巻き上げが停止すること、② τ_{ce} 以上のせん断応力で段階的にせん断応力を増加させると、最初から一定のせん断応力で巻き上げられた場合より巻き上げられにくくなること、③同一含水比の底泥の場合、せん断応力が大きいほど急速巻き上げ期が短時間で終了し、SS 濃度が変化しなくなること、を示した。これらの実験事実は底泥がせん断応力を受け、巻き上げられる過程で底泥が何らかの変化を受けていることを示唆している。以下ではこの機構について実験的に検討する。

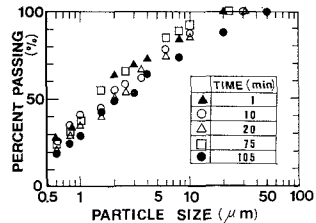
図—14 に試料として筑後泥Ⅱを用い、初期含水比 400% で 2 時間通水後、水路床に残存した底泥の固体分率の鉛直分布を示す。縦軸は水路床から累積した単位面積当たりの乾燥底泥量を示す。したがって図中の最上点が



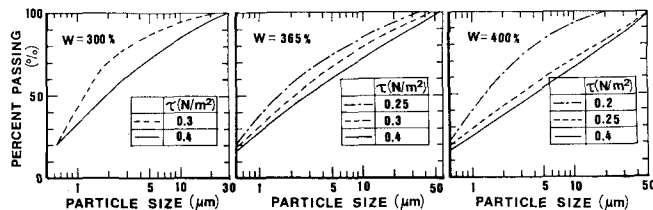
図—14 実験終了時の底泥の固体分率の鉛直分布



図—15 実験終了時の底泥の粒度分布



図—16 懸濁液の粒度の時間変化



図—17 SS 一定時の懸濁液の粒度分布

残存底泥の最表層である。また、図中の縦の実線は初期の固体分率を示している。固体分率は表層から下層に行くに従って低下し、最小値をとり、次に水路床に近づくに従って増加している。また、初期の含水比が同じでも、せん断応力が大きいほど実験終了時の表層の固体分率が大きくなっていることが認められる。水路床近くでの固体分率の増加は底泥の圧密によると考えられるが、表層部の固体分率の増加は特異な現象であり、この表層部の固体分率の増加が巻き上げ速度の低下を引き起こしていると考えられる。つまり、式 (1) に示したように固体分率が増加すると τ_{ce} が増加し、式 (2) からわかるように τ_{ce} の増加が巻き上げのフラックスの低下を引き起こすので、巻き上げ過程で表層近くの固体分率が増加し、その結果として巻き上げ速度が時間的に低下すると考えられる。

図—15 は筑後泥Ⅱで含水比 400%、 $\tau = 0.3 \text{ N/m}^2$ の場合の巻き上げられずに残存した底泥の表層付近の粒度分布を示したものであり、第 1 層は最表層であり、各層の厚さは 0.5~1 mm 程度である。これより、第 1, 2 層では細かな粒子の存在量が低下し、第 3 層以下ではほとんど変化していないことがわかる。図—16 は巻き上げにより水中に懸濁した粒子の粒度分布の経時変化を示している。粒度分布は時間の経過に従って若干粗くなる傾向が認められるが、水路床に敷いた元の底泥の粒度よりは細かくなっている。つまり、細かい粒子の方が巻き上げられやすい、すなわち、選択的巻き上げが少し生じていることがわかる。また、図—17 は筑後泥Ⅱで種々の含水比およびせん断応力の下で、SS 濃度が一定に達した状態において懸濁液を構成する粒子の粒度分布を示したものである。これより、同一含水比ではせん断応力が大きくなると粒子径が大きくなり、水路床に敷いた元の底

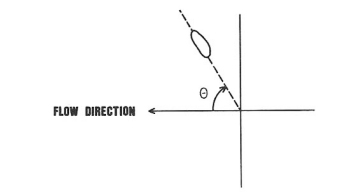
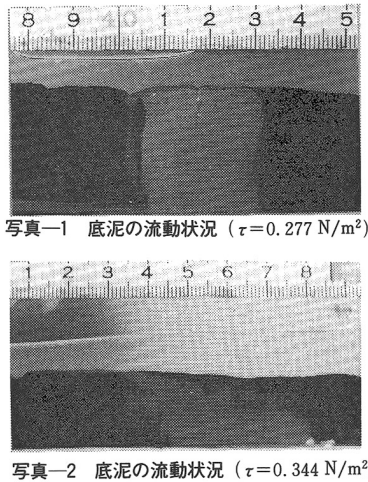


図-18 配向度の測定方法 (写真-3, 4 と同じ位置関係)

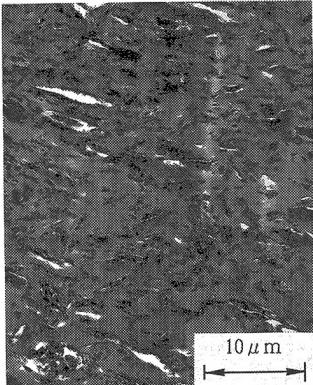


写真-3 電子顕微鏡写真 (表層から 0.2 mm)

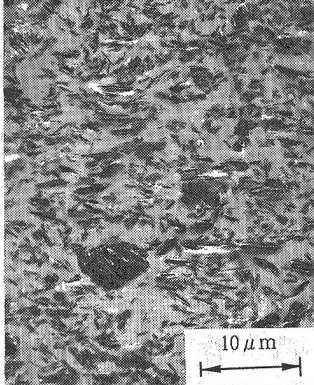


写真-4 電子顕微鏡写真 (表層から 2.0 mm)

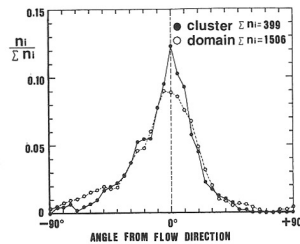


図-19(a) 配向度分布 (表層から 0.2 mm)

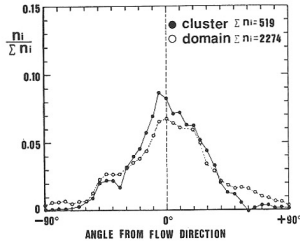


図-19(b) 配向度分布 (表層から 2.0 mm)

泥の粒度分布に近くなっており、選択巻き上げの程度が小さくなっている。一方、先に示したように底泥表層部の固体分率の増加はせん断応力が大きくなるほど顕著になったので、この場合選択的巻き上げは、固体分率の増加には二次的影響を与えているにすぎないと考えられる。

d) 巻き上げ時の残留底泥の表面近傍の流動状況と粒子構造の変化

以上の実験結果より、巻き上げ速度の時間的な低下が底泥の表層近くの固体分率の増加によって引き起こされていることが明らかになった。本研究で扱うような柔らかい底泥の巻き上げ時には、底泥がせん断応力を受けることにより下流方向に移動するのが観察された。そこで、底泥の移動量の鉛直分布を筑後泥 I について測定した結果が写真-1, 2 である。流れは写真上で右から左であり、写真は実験を開始してから 6 分経過したときの状況を示している。これより、表層部の底泥は下流方向にかなり移動し、さらに、せん断応力が大きくなるほど移動距離も大きくなっていることがわかる。また、底泥下層部に行くほど底泥の移動距離が小さくなり、最下層近くの底泥はほとんど移動せず、このことは下層部ほど大きな移動に対する何らかの抗力が働いていることを示している。以上より、底泥の巻き上げ時には、底泥表層部が流動し、その流動により底泥の固体分率が大きくなると考えられる。そこで、その機構を解明するため、透過型電子顕微

鏡で底泥を構成する粒子群を撮影し、その粒子群の配向性を検討した。試料としては切片の作製が容易なカオリンを用い、初期の試料含水比を 300%、せん断応力を 0.364 N/m^2 として、2 時間通水後水路床に残存する試料について、流れと平行に鉛直方向に切った断面における表層から 0.2 mm 付近の粒子構造を写真-3 に、2.0 mm 付近のものを写真-4 に示す。なお、流れはほぼ右から左である。粒子の配向性としては底泥内で三次元配置をしていると考えられるが、ここでは流れ方向のみについて考えることにし、図-18 に示したように二次元的にとらえ、流れ方向からの角度 θ ($-90^\circ \leq \theta < 90^\circ$) を $\Delta\theta=5^\circ$ 間隔で測定して、この θ の分布により配向性を表わすことにする。粘土の構造単位としては小さい単位より、個々の粒子、ドメイン、クラスター、ベッドがある²²⁾が、粘土は個々の粒子としてはほとんど存在せず、また、本研究では試料の含水比が高いためベッドとしては認識できないので、ここでは認識できる最小の単位をドメインとみなし、これらの集合をクラスターと考える。図-19(a), (b) に写真-3, 4 から得た θ の分布を示す。縦軸は各 $\Delta\theta$ 内での個数を全個数で正規化したものを示している。これより、 $\pm 30^\circ$ の範囲内に全個数の 8 割程度が入り、粒子群は流れ方向にかなり配向しているのがわかる。また、クラスターの方がドメインよりも配向性が高く、表層部に近い方がクラスター、ドメインとも配

向性が高くなっていることがわかる。

以上の実験結果より、底泥がせん断応力を受け巻き上げられる場合、底泥内では圧密のほかに以下に示すような機構が生じていると考えられる。まず、せん断応力が底泥に作用する。底泥内にはせん断に抵抗する2つの力が存在する。1つは限界せん断応力であり、これは重力によらず底泥の凝集力あるいは粘着力から生じており、固体分率の関数として定義できる。他は重力の作用のもとで、ある粒子が移動あるいは回転する場合に、それより上方にある粒子を押し退けるのに必要な力である。後者の力は下層部の粒子が水平移動しないという実験結果より、底泥下部に行くほど大きくなると考えられる。表層部の粒子は固体分率が同じでも、後者の抵抗力が小さいため、流動し、巻き上げを受ける。この流動により表層部の粒子はドメインより大きな構造単位で流れ方向に配向する。緩やかなせん断とその結果としての配向により砂粒子の単純せん断時にもみられるように、構造単位間の水が排出されることによりマクロな間隙が小さくなり、固体分率が増加し、巻き上げのフラックスが小さくなっていくと考えられる。したがって、ある時間における底泥表層の固体分率は、硬化の速度と硬化しつつある底泥を上層水中へ移動させようとする巻き上げの速度の双方の大きさによって決定されている。

次に示す巻き上げ過程のシミュレーションでは第1番目の抵抗力を巻き上げの限界せん断応力とし、この応力をビンガム降伏値に等しいとし、第2の抵抗力を有効応力に比例するとし、圧密と合わせて考える。

4. 底泥の巻き上げ過程のシミュレーション

(1) 基礎方程式

3. で得られた実験結果に基づき、ここでは筑後泥Ⅰについて巻き上げ過程のシミュレーションを行う。まず、固相と液相の物質保存式は²⁴⁾、

$$\frac{\partial(1-\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial V_s}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots(6)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial V_l}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 ϵ ：空隙率、 V ：空塔速度、 x ：鉛直上向きに取った座標、 t ：時間であり、添字 s と l はおのおの固相と液相を示す。

運動方程式は前節で述べたように、圧密と流動による影響を双方考慮したものでなければならない。しかしながら、これら双方を考慮した構成則を見出すことは現在のところ困難であるので、双方の影響を線形結合的に取り扱うことにする。

圧密に関する運動方程式は²⁴⁾、

$$\frac{\partial P_s}{\partial x} - \frac{\mu}{k} \left(V_l - \frac{\epsilon V_s}{1-\epsilon} \right) + (1-\epsilon)(\rho_s - \rho_l)(g) = 0 \dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial P_l}{\partial x} + \frac{\mu}{k} \left(V_l - \frac{\epsilon V_s}{1-\epsilon} \right) = 0 \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 P_s ：有効応力、 P_l ：過剰間隙水圧、 μ ：粘性係数、 k ：透水係数、 ρ ：密度、 g ：重力加速度である。 k と P_s は実験より、空隙率の関数として、次式で表わされた。

$$P_s / \rho_l g = 0.0263 (1-\epsilon)^{1.17} \quad [m] \dots\dots\dots(10)$$

$$k = 2.02 \times 10^{-16} [\epsilon^3 / (1-\epsilon)^2]^{1.61} \quad [m^2] \dots\dots\dots(11)$$

また、底泥の水平流動による硬化現象を表わすために、次のように前提および仮定をおく。

- ① 底泥はビンガム流体としての挙動を示し、塑性粘度は降伏値に比例する（比例定数 β ）。これはすでに実験的に確認されている^{5),23)}。次に、仮定として、
- ② 底泥の降伏値は底泥のひずみ速度の時間積分値に比例して増加する（比例定数 α ）。
- ③ 底泥には粒子間分子力や電気力にのみ起因する降伏値のほかに、重力に起因する有効応力に比例する（比例定数 γ ）水平方向の力がせん断に抵抗する力として働く。すなわち、 γ は有効応力に対する摩擦係数の意味を有する。
- ④ 底泥の降伏値と巻き上げの限界せん断応力とは等しい。
- ⑤ 底泥の挙動は緩やかで慣性項を無視できる。

以上より、底泥の流動に関する運動方程式および構成方程式は、

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots(12)$$

$$\tau = -(\tau_y + \gamma P_s) - \mu_p \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \text{ for } \tau \geq \tau_y + \gamma P_s \dots\dots(13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \text{for } \tau < \tau_y + \gamma P_s \dots\dots(14)$$

となる。また、仮定②は本来 $\int_0^t \frac{\partial u}{\partial x} dt$ が増加するに従い、 $(1-\epsilon)$ が増加し、その結果 τ_y が増加することを示しているが、 $(1-\epsilon)$ がどのように増加するかは式(1)によるものとして、 τ_y の増加を $\int_0^t \frac{\partial u}{\partial x} dt$ の一次式として表現することにすれば、仮定②、④と①から、

$$\tau_y = \alpha \int_0^t \frac{\partial u}{\partial x} dt + \tau_{y0} \dots\dots\dots(15)$$

$$\tau_y = \tau_{ce} \dots\dots\dots(16)$$

$$\mu_p = \tau_y / \beta \dots\dots\dots(17)$$

となる。ここで、 τ ：底面せん断応力、 τ_y ：降伏値、 τ_{y0} ：初期降伏値、 τ_{ce} ：巻き上げの限界せん断応力、 u ：底泥の移動速度、 μ_p ：塑性粘度、である。

巻き上げのフラックスとしては式(2)を用いる。以上の式より、圧密の場合には ϵ が与えられると、式(10)、(11)を用い、 $V_l + V_s = 0$ を考慮することにより、式(8)あるいは式(9)から V_s が得られる。 V_s が

わかると、式(6)から ϵ の時間変化量が求められる。底泥の流動に伴う硬化については、 ϵ が与えられると式(10)より P_s 、式(1)と式(16)より τ_y が与えられ、式(13)あるいは式(14)から $\partial u/\partial x$ が得られる。次に、式(15)、(16)、(1)から次の時間ステップでの ϵ が求められる。ただし、この硬化時の脱水機構は明らかでないためここでは脱水はきわめて速く行われるとしている。以上より底泥の圧密と流動に関する運動方程式を差分化し、 Δt ごとに双方求め、重畳することにより巻き上げ過程のシミュレーションが可能になる。

計算は、まず、座標 x を質量座標 \tilde{w} に次式、

$$\tilde{w} = \int_0^x (1 - \epsilon) \rho_s dx \dots \dots \dots (18)$$

によって変換し、 Δt を1秒、 $\Delta \tilde{w}$ を0.01 kg/m²とする差分法で行った。

なお、 β の値は0.1²³⁾とし、初期の空隙率は底泥全層で0.906、境界条件として底泥最下層での V_s を0とした。

(2) シミュレーションの結果および考察

図-20に $\gamma=0.01$ とした場合の単位面積当たりの巻き上げられた底泥量の経時変化の計算例を示す。図中のプロットは実験値を示している。 α を0とした場合、すなわち、底泥表層部の流動による硬化がないとした場合には、この程度の時間では圧密による固体分率の増加が無視できる程度なので、巻き上げられた底泥量は時間とともに増加してしまい、実験値とは大きく異なっている。 α の値を大きくするに従い、固体分率の増加速度が速くなるため、巻き上げ速度、最大巻き上げ量とも小さくなり、 α の値を0.003 N/m²程度にとると、計算結果は実験値をよく表わすようになる。

図-21は底泥の移動距離の鉛直分布の経時変化の計算結果を示している。移動距離は時間の経過とともに増加するが、その増加速度は徐々に小さくなっている。また、底面せん断応力が大きくなるに従い、底泥の移動が起こる深さは大きくなり、移動距離の鉛直勾配も大きくなっており、3.で示した実験結果と同様の傾向を示している。しかし、実験時の移動距離は、計算値よりも実験開始直後でより大きかった。

図-22(a)は終了時(60分)の固体分率の計算結果を、図-22(b)は実験結果を示している。底泥表面付近の固体分率の増加は、主に底泥の変形によるものであり、底面付近での増加は圧密によるものである。固体分率の計算結果は実測値より中間層で若干小さくなっているが、おおむね実験結果をよく表わしている。

以上より、本モデルでの計算結果は柔らかい底泥の巻き上げ過程をよく表わしている。

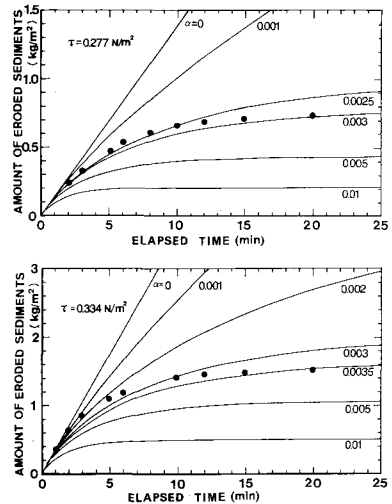


図-20 巻き上げ量の経時変化

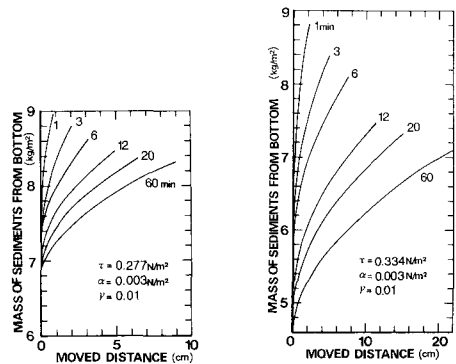


図-21 底泥移動量の鉛直分布 (計算値)

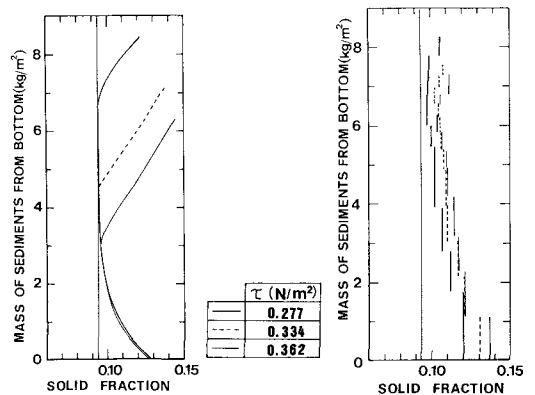


図-22(a) 底泥の固体分率の鉛直分布 (計算値)

図-22(b) 底泥の固体分率の鉛直分布 (実験値)

5. 結 論

本研究ではまず底泥の巻き上げ形態を分類し、次に、柔らかい底泥の巻き上げ過程に関して、実験的検討を行い、巻き上げの限界せん断応力、SSの経時変化、巻き

上げられずに水路床に残存する底泥の固体分率と粒度の鉛直方向の変化、底泥表層部の流動状況と粒子群の配向性の変化を明らかにした。さらに、実験で得られた知見をもとに、底泥の流動による底泥の硬化と圧密を考慮した場合の底泥の挙動を示す基礎式を導き、底泥の巻き上げ過程のシミュレーションを行った。以下に本研究で得られた結論を示す。

(1) 底泥の巻き上げ形態は各底泥につき含水比により3つに分類でき、おのおのの含水比の範囲はスランプ値を用いることにより、試料の種類によらず一義的に決定される可能性がある。

(2) 巻き上げの限界せん断応力は各底泥につきおのおの異なるが、固体分率の関数として表わし得る。

(3) 底泥の巻き上げのパターンは初期の急速巻き上げ期とその後の緩速巻き上げ期に分けられ、2時間程度通水すると巻き上げが停止する。また、初期の巻き上げ速度 $E_{t=0}$ は、 $E_{t=0} = \delta(\tau/\tau_{ce} - 1)^m$ で表わされる。急速巻き上げ期の持続時間 T とせん断応力とは $T \sim (\tau - \tau_{ce})/\mu_B$ の関係があり、同一せん断応力の場合、底泥の固体分率が低いほど、同一固体分率の場合 τ が大きいほど T が短くなり、巻き上げが短時間で停止する。

(4) 巻き上げ速度の時間的な低下は底泥表層部の固体分率の増加に起因し、選択的巻き上げによる底泥表層部の粒度の粗粒化は2次の影響を及ぼすにすぎない。

(5) 底泥表層部の固体分率の増加は底泥がせん断応力を受けて、流動し、表層部の粒子群が流れ方向に配向し、このとき間隙水が排出されるために起こる。

(6) 底泥の降伏値が底泥のひずみ速度の時間積分値に比例して増加し、さらに、底泥には降伏値のほか有効応力に比例する水平方向の力がせん断に抵抗する力として働くなどの仮定を導入し、底泥の流動と流動による底泥の硬化をモデル的に式表現し、これらの式をもとに底泥の巻き上げに関するシミュレーションを行った結果、巻き上げ過程をよく表わし得た。

参考文献

- 1) たとえば、Chow 著、石原藤次郎訳：開水路の水理学 I、第7章、丸善、1962。
- 2) Dunn, I. S. : Tractive resistance of cohesive channels, Proc. of the ASCE., Vol. 85, No. SM3, pp. 1~24, 1959.
- 3) Rektorik, R. J. and Smerdon, E. T. : Critical shear stress in cohesive soils from a rotating shear apparatus, Paper No. 64, ASAE., 1964.
- 4) Migniot, P. C. : Etude des proprietes physiques de differents sediments, La Houille Blanche, Vol. 23,

No. 7, pp. 591~620, 1968.

- 5) 大坪国順・村岡浩爾：底泥の物性及び限界剪断応力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第363号/II-4，pp. 225~234，1985。
- 6) Smerdon, E. T. and Beasley, R. P. : Critical tractive forces in cohesive soils, Agricultural Engineering, Vol. 42, pp. 26~29, 1961.
- 7) Grissinger, E. H. : Resistance of selected clay systems to erosion by water, Water Resources Research, Vol. 2, No. 1, pp. 131~138, 1966.
- 8) Ariathurai, R. and Arulanandan, K. : Erosion rates of cohesive soils, Proc. of the ASCE., Vol. 104, No. HY2, pp. 279~283, 1978.
- 9) Kelly, W. E. and Gularte, R. C. : Erosion resistance of cohesive soils, Proc. of the ASCE., Vol. 107, No. HY10, pp. 1211~1222, 1981.
- 10) Sargunam, A. P., et al. : Physico-chemical factors in erosion of cohesive soils, Proc. of the ASCE., Vol. 99, No. HY3, pp. 555~558, 1973.
- 11) Arulanandan, K., et al. : Pore and eroding fluid influence on surface erosion of soil, Proc. of the ASCE., Vol. 101, No. GT1, pp. 51~65, 1975.
- 12) Partheniades, E. : Erosion and deposition of cohesive soils, Proc. of the ASCE., Vol. 91, No. HY1, pp. 105~139, 1965.
- 13) 大坪国順・村岡浩爾：流れによる底泥の飛び出し率，土木学会論文報告集，第375号/II-6，pp. 43~52，1986。
- 14) 滝 和夫・岡 正義：河川底泥の巻き上がり現象に関する基礎的研究，衛生工学論文集，第20巻，pp. 41~50，1984。
- 15) 国分正胤編：土木材料実験，技報堂出版，pp. 115~118，1973。
- 16) 岩崎訓明：コンクリートの特性，第2章，共立出版，1978。
- 17) Mehta, A. J., et al. : Resuspension potential of deposited cohesive sediment beds, V. S. Kennedy, Editor, pp. 591~609, Academic Press, New York, 1982.
- 18) 二渡 了・海田輝之・楠田哲也・粟谷陽一：円形回転水路とその流況特性，九大工学集報，第57号，第4号，pp. 431~435，1984。
- 19) 串田 弘：電子顕微鏡の試料作製方法，ニュー・サイエンス社，1971。
- 20) 佐藤裕一：吸着水分子の配向構造について，農業土木学会論文集，第95号，pp. 50~56，1981。
- 21) 土木学会編：水理公式集，昭和46年改訂版，pp. 201。
- 22) Young, R. N., 山内豊聡ら監訳：新編土質工学の基礎，鹿島出版会，1978。
- 23) 楠田哲也・二渡 了・古賀憲一・粟谷陽一：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，第21巻，pp. 91~98，1985。
- 24) 楠田哲也・古賀憲一・粟谷陽一：汚泥の沈降濃縮に関する研究，土木学会論文報告集，第294号，pp. 59~71，1980。

(1987. 5. 6・受付)