

霞ヶ浦底泥の洗掘過程に関する実験的研究

梅田 信¹・高峰一²・石川忠晴³・大滝 諭⁴・市山 誠⁵

¹正会員 博(工) 財団法人ダム水源地環境整備センター
(〒102-0083 東京都千代田区麹町2-14-2 麹町NKビル)

E-mail: umeda@wec.or.jp

²学生会員 工修 東京工業大学大学院総合理工学研究科(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

³フェロー 工博 東京工業大学大学院総合理工学研究科(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

⁴正会員 修(工) 日本工営株式会社(〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4)

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 筑波実験場(〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)

霞ヶ浦の浚渫泥を敷き詰めた比較的大型の実験水路を用いて、底泥の洗掘実験を行った。実験対象とした底泥は、含水比が数百から千数百パーセントにも達するため、実験方法には工夫及び注意が必要であった。まず底泥の実験条件の形成は、底泥と水を十分に攪拌した懸濁液を所定の日数、放置して行った。また同時に作成したサンプルを用いて含水比の鉛直分布を詳細に測定した。泥面位置(洗掘量)計測の方法に関しては、泥面低下と圧密度の両方を計測するための装置を制作した。

流量と放置日数(すなわち含水比)を変化させたケースを設定し、実験結果を整理したところ、洗掘速度は流速(せん断応力)と含水比(見かけ密度)の関係によって表現できることが示された。

Key Words : fluid mud, erosion rate, water content, critical shear stress, Lake Kasumigaura

1. 序論

湖沼、内湾、河川感潮域などの閉鎖性水域には、有機物や栄養塩を多量に含む高含水比・高流動性の底泥が堆積している場合が多い。これらは上層水の流動によって容易に浮上するため、水質や生物の生息環境に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

本研究で対象としている霞ヶ浦では、利水および水質改善方策として、那珂川からの導水事業が着手されている。しかし導水が放流される際、放流口付近に堆積している底泥を洗掘することにより、湖内水質が局所的に悪化する可能性がある。そこで、放流施設の設計に当たり、現地ヘドロの耐洗掘性を明らかにしておく必要がある。

底泥の挙動は種々の環境現象に関わっていることから、近年、底泥の運動特性に関する研究が盛んに行われるようになってきた。これらは、対象とする場の性質により、振動流的外力を想定したもの^{1),2),3),4)}、乱流的外力を想定したもの^{5),6)}、及び一方向的流れを想定したものなどに大別される。本研究は一方向的流れに伴う高含水比底泥の洗掘現象を実験的に検討するものである。

この種の研究は、1980年代以降、主に実験的に実施されてきた。例えば大坪・村岡は、霞ヶ浦などの

湖沼底泥と人工的に調合した泥に対して実験を行い、限界掃流力⁷⁾とpick up rate⁸⁾を含水比、粘度、降伏応力などの物性値に関連づけて整理している。海田ら⁹⁾は、筑後川河口部の底泥とカオリンの洗掘過程について実験を行い、水流作用による底泥の構造変化が洗掘速度に影響を及ぼすとしている。Fukuda and Lick¹⁰⁾は、エリー湖底泥の洗掘速度や平衡濁質濃度と底面せん断応力及び含水比の関係を検討している。McNeilら¹¹⁾は、Detroit川、Fox川で採取した不攪乱コアについて、洗掘速度と底泥物性の鉛直分布の関係を調べている。またJepsenら¹²⁾は、3河川(Detroit川、Fox川、Santa Barbara湿地)で採取した底泥を攪拌後、放置する期間を変化させることで見かけ密度の鉛直分布を様々に変えた条件下での洗掘実験を行った。その結果について、見かけ密度とせん断応力の関数として、洗掘速度を表現している。また関根ら^{13),14),15),16)}は、砂と粘土が混合された粘着性土の洗掘について水路実験を行ってきている。その結果、浸食速度に対して、粘土含有率・水含有率・水温および砂と粘土の粒径比が重要な要因であると考察している。

ところで、底泥運動に関する実験は、砂や砂利などの移動床実験に比べると実験材料の搬入・保存・後始末が容易ではないため、比較的小型で閉鎖的構

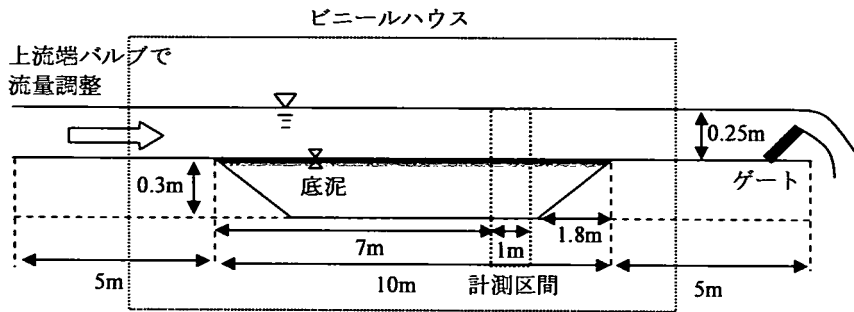


図-1 実験水路の概要

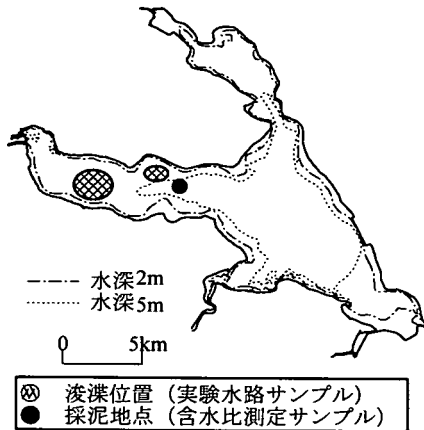


図-2 霞ヶ浦平面図と採泥・浸漬地点

表-1 実験条件

ケース名	放置期間 (day)	流量 (l/s)	通水時間 (min)	初期断面 平均流速 (cm/s)
CASE1	2	25	30	22.3
CASE2	2	30	30	27.6
CASE3	2	35	30	32.6
CASE4	4	38	20	32.3
CASE5	4	45	30	36.4

けられない。したがって、砂などを対象とした通常の移動床実験と同様に、直線開水路で実験区間を長く取るという「単純な実験」も必要であるように思われる。

そこで本研究では、屋外に実験水路を設け、その下流部に大面積の沈砂池を設置して発生した濁水の始末の問題を無くすとともに、直線の移動床部を十分に長く確保して上下流端の影響を生じないようにして実験を行った。また、霞ヶ浦浸漬泥を入手し、十分深い泥敷部の中で水と良く攪拌し、時間をかけて堆積・圧密させることにより、現地に近い堆積状態を形成させた。さらに、予備実験において側壁粗度を評価して、泥面に作用するせん断応力がある程度正確に評価できるようにした。

実験結果の取りまとめについては、まず既往の研究に倣い、せん断応力及び限界掃流力を用いて洗掘速度を定式化した。しかし河川の場合と異なり、明確な水面勾配が生じない湖沼では、底面せん断応力の評価そのものが容易でない場合が多い。また泥の物性にしても、含水比または平均密度以外の物性や粒子構造を求めるのは、比較的困難である。そこで本論文では、最後に結果の実用性を重視し、流速と含水比を基本的な指標として洗掘速度の定式化を行い結論とした。

造の装置を工夫しているものが多い。例えば、前述の大坪・村岡^{7,8)}は、幅 15cm、高さ 5cm、全長 10m の管路において、幅 10cm、長さ 90cm の部分を 2cm 厚さのピットとして移動床を形成している。MacNeil¹¹⁾や Jepsen¹²⁾は、幅 10cm、高さ 2cm、全長 135cm の管路において、幅 10cm、長さ 15cm の移動床部を、洗掘に応じてジャッキで持ち上げ、移動床面と固定床面の境を常に平らにする工夫を行っている。また、円形回転水槽を用いた実験も多いが、海田⁹⁾や Winterwerp and Kranenburg¹⁷⁾は、フタと水路を逆回転させることで二次流を最小限に抑えるよう¹⁸⁾工夫をしている。

しかし閉鎖的でコンパクトな装置は、どうしても装置固有の癖があり、また流入出部や移動床・固定床の接合部の影響が生じやすい。さらに、底面(移動床部分)に作用しているせん断応力の評価も容易でない場合が多い。加えて、装置内に実験材料を敷き均す過程で、自然の堆積状態と異なった状態になりやすい。その結果、装置相互間の実験データの比較や現地適用性については若干曖昧になることが避

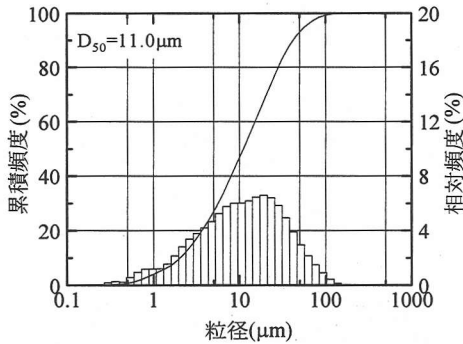


図-3 実験に用いた底泥の粒度組成

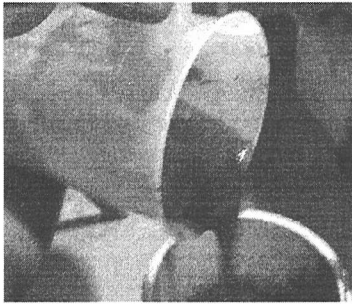


写真-1 底泥の流動性状

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置と底泥

実験装置の概略を図-1に示す。実験水路は長さ20m、幅40cm、高さ60cmのコンクリートブロック表面モルタル仕上げの矩形断面開水路である。上下流端から5mの区間を底上げし、中央部分に長さ10m、幅0.4m、深さ0.3mの移動床部を設け、そこに実験用の底泥を投入した。移動床の両端は勾配1/6のスロープになっており、固定床との境界で局所的な洗掘が生じないようにしている。測定区間は水路の上流端から12m地点と13m地点の間の1mとし、両側壁面から0.1mを除いた幅0.2mを測定領域とした。また、測定区間の右岸側の壁面は透明アクリル製とし、洗掘が進行する様子を観察できるようにした。

本実験水路では、かなり多量の泥を使用するため、霞ヶ浦の図-2にハッチで示す水域で浚渫された底泥を利用した。浚渫は、浚渫船により泥厚30cm程度までに対して行われている。実験試料は、沈殿池で一旦混合・堆積した後の未固化の底泥を輸送して用いた。この底泥の粒度組成を図-3に示す。中央粒径は11μmで、粘土からシルトまでの広範囲の粒子を含んでいる。土粒子の平均密度は2.43 g/cm³であった。

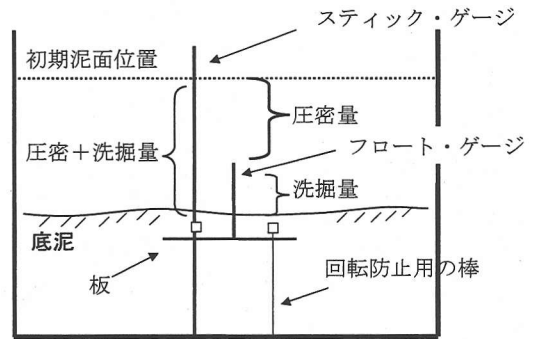


図-4 フロート・ゲージによる圧密量の測定方法

2(4)節で示すように含水比は1000%のオーダーであり、写真-1に見られるように流動性が非常に高い。

(2) 底泥の初期状態ならびに実験条件の設定

水路に適量の泥を投入し、水路床から43cmまで水を満たした後、水路全体で均一の懸濁液になるまで十分攪拌した。この懸濁液を一定期間放置して自然に沈降・堆積させ、底泥の初期状態を作り出した。また放置期間を変化させることにより圧密状態を変えたケースを設定した。

実験条件は下流端水位を25cmとし、底泥攪拌後2日間放置した状態で流量25, 30, 35 (l/s) の3ケースを行い、4日間放置した状態で流量38, 45(l/s)の2ケースを行った。通水時間は、計30分(4日放置の流量38l/sのみ20分)としたが(表-1)、各実験において、5分または10分毎に通水を中断し、泥面の低下量を計測した。

(3) 泥面低下量の測定方法

泥面低下量を推定するために、測定領域内に1mm間隔の目盛を刻んだ直径1mmの金属製の棒(以下「スティック・ゲージ」)を、水路の横断方向に5cm間隔で5本、縦断方向には25cm間隔で5本の計25本を垂直に立てた。これらのゲージの泥面の値から泥面低下量を求めた。なお、通水前にスティック・ゲージの先から静止水面までの距離をポイントゲージで測定し、各ゲージの読み値を絶対高さに換算できるようにしている。

本実験に用いた霞ヶ浦の底泥は、含水比が数百%から千数百%の流体的泥質である。そのため、実験中にも圧密沈下する。そこで以下の装置を用いて圧密沈下量を推定した。含水比が約1000%の泥とほぼ同じ密度のプラスチック材料で作成した板に目盛付きの短い棒(以下「フロート・ゲージ」)を取り付け、これを泥中に浮かせるように泥面に設置した。フロート・ゲージは泥とともに沈下するので、隣接

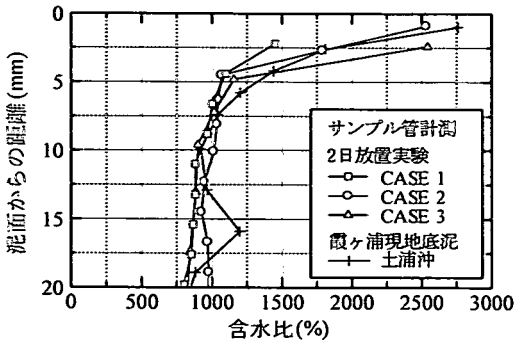


図-5(a) 含水比の鉛直分布の測定結果
(サンプル管計測)

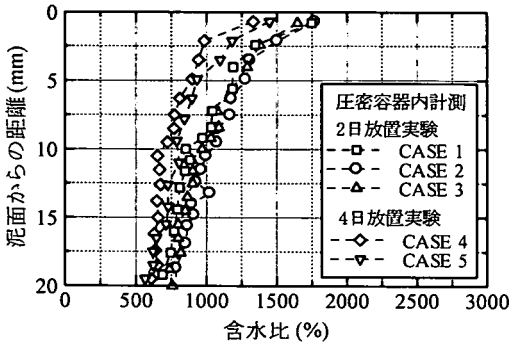


図-5(b) 含水比の鉛直分布の測定結果
(圧密容器内計測)

するスティック・ゲージとの読み値の差から圧密量を求めた。フロート・ゲージの設置を図-4に模式的に示す。通水によってフロート・ゲージが流されないよう、板に穴をあけ、そこに長いスティック・ゲージを差し込むようにし固定している。またフロート・ゲージが回転したり傾いたりしないように、底面に固定されたスティック・ゲージのほかに2本の棒を板に通して安定させた。このようなセットを側壁から10cm, 20cm, 30cmの位置に設置し、圧密量はその3箇所から測定されたものの平均値とした。

なお、フロート・ゲージが泥層圧密とともに沈下するかどうかを確認するため、攪拌から1日後の約5時間にわたり、フロート・ゲージと泥面の低下状況を調べた。その結果、このときの圧密沈下量(約15mm)に対し、10分の数mm程度の範囲で誤差が見られたものの、フロート・ゲージは概ね泥面と平行に沈下していることが確認された。

(4) 含水比の測定方法

自然に堆積させた泥層は、深い部分ほど含水比が小さくなる。このため、洗掘が進むにつれて洗掘速

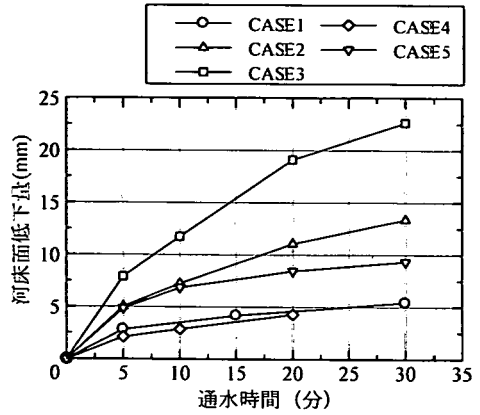


図-6 河床面低下量の測定結果

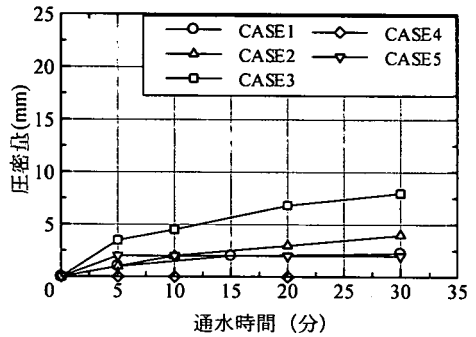


図-7 圧密量の測定結果

度が小さくなると予想される。そこで泥層の含水比の鉛直分布を以下のように調べた。

まず、比較のために、実験用底泥が浚渫された土浦入りにおいて、図-2に●で示す地点で柱状コアを採取した。採取には直径5cmの柱状サンプラー(離合社製改良型コアサンプラー)を用いて、泥面から約40cmまでを採取した。採取後直ちにドライアイスで凍結した上でサンプルを管から引き出し、カッターで所定の厚さに切断してから実験室に持ちかえり、含水比を計測した。また実験水路においては、通水開始直前に、測定区間から十分離れた上流部で直径5cmの亚克力管を用いて柱状コアを採取し、現地と同じ方法で処理し含水比を計測した。以上の結果を図-5(a)に示す。水路で2日間かけて堆積させた泥層と現地底泥の鉛直分布が類似していることがわかる。

上記の方法で得られた含水比は、泥面から5mmの範囲で急激に上昇している。しかし、採取時に目視したところでは、サンプリング管ごと凍結する際に、温度の不均一によりどうしても泥面付近に歪みが生じて上層水が混入する。このため、現地サン

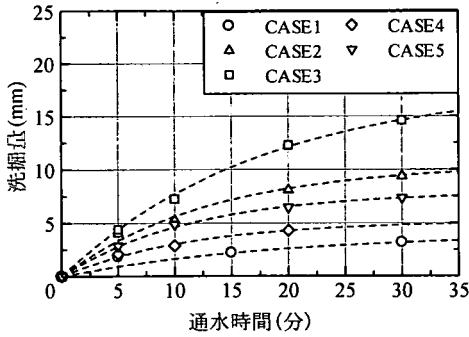


図-8 洗掘量時系列の測定結果

ルでも水路サンプルでも、表層の数 mm では、実際より大きな値が求められてしまう恐れが認められた。そこで、泥面付近の計測精度を上げるために以下の方法を採用した。

直径30cmの容器内で、実験水路と全く同じ手順で泥を攪拌し、同じ期間で自然沈降・圧密をさせた後、表層水をサイホンで慎重に引き抜いて、冷凍庫で凍結させた。この方法だと冷却が比較的均一となり、泥面の歪みはほとんど生じなかった。このサンプルを調理用の皮剥き器で約1mmごとにスライスし、各層ごとに含水比を計測した。その結果を図-5(b)に示す。2日放置の泥層の表面から5mm以下では、図-5(a)とほとんど同じ分布となっているが、表層では含水比が小さくなっていることが分かる。そこで本研究では、図-5(b)の含水比分布を、水路内の真の分布であるとみなすことにした。

3. 実験結果

(1) 洗掘量の測定結果

洗掘された泥は個々の粒子に分散して下流に流れ去り、移動床上に堆積することはなかった。スティック・ゲージで測定された河床面低下量の結果を図-6に示す。これらは基本的には設置した全25ヶ所の平均値であるが、スティック・ゲージにゴミや藻がからまって局所的に掘れてしまったものなどは除いている。流量の増加に伴い低下量も増加し、通水が進むほど低下速度は鈍くなっている。これは、対象とする泥の性状が異なるものの、関根ら¹³⁾の実験結果の傾向と一致している。

フロート・ゲージで測定された圧密量の結果を図-7に示す。流量が大きいほど圧密量も大きくなり、通水時間が長くなるほど圧密速度は遅くなっている。通水時には水路縦断方向での泥面の揺動が観察されており、この揺動が圧密を促進していた可能性があ

表-2 終端洗掘限界条件の推定結果

ケース名	Z_0 [mm]	λ [min ⁻¹]
CASE1	4.0	0.0523
CASE2	10.5	0.0765
CASE3	18.0	0.0560
CASE4	5.2	0.0872
CASE5	7.9	0.0877

る。なお、通水をせずに2日放置した時の河床面の圧密速度は約1.2mm/h、4日放置した時で約0.5mm/hであり、通水時の圧密沈下量より小さかった。

洗掘量は、図-6の河床面低下量から図-7の圧密量を差し引くことで求まる。その結果を図-8に示す。通水が進むにつれて洗掘速度が徐々に減少しているが、これは洗掘により断面が広がるため流速が小さくなることと、含水比の低い泥が表面に現れてくるために耐洗掘性が高くなることの二つが原因と考えられる。

関根らの実験¹⁶⁾においては、含水比が鉛直的に大きな変化が見られないことなどから、流速の低下が原因で洗掘速度が小さくなると考察している。それに対して本実験では、通水中の断面増加量はたかだか8%である。また底泥の自然堆積条件を作り出していることから、図-5のように含水比の鉛直変化が非常に大きい。そのため、本研究においては後者の影響度合いの方が大きいと考えられる。なお図-8中の点線は、次節に述べる方法で求めた近似曲線である。

また、これらの通水とは別に、流量を徐々に増加させて洗掘が開始する流速（限界流速）を求めたところ、2日放置の泥では17.9cm/s、4日放置の泥では19.7cm/sであった。

(2) 洗掘限界条件の推定

図-8では、洗掘速度が次第に小さくなり、各ケースの条件（流速及び泥圧密）に応じた洗掘深へと漸近しているように見える。すなわち、いずれのケースも、前節末に述べた洗掘開始に対する洗掘限界だけではなく、洗掘終端における洗掘限界が存在すると考えられる。そこで、各ケースの最大洗掘量を以下のように推定した。

洗掘深 Z がある値 Z_0 に収束すると仮定し、時系列変化を

$$Z = Z_0(1 - \exp(-\lambda t)) \quad (1)$$

の様な関数で近似する。ここに、 λ は定数、 t は通水時間である。この式を時間 t について微分すれば、洗掘速度が求められる。

表-3 固定床に対する水面勾配の測定結果

流量 [l/s]	水面勾配	平均流速 [m/s]
29.8	1.9×10^{-4}	0.297
40.0	3.8×10^{-4}	0.394
50.0	6.3×10^{-4}	0.487

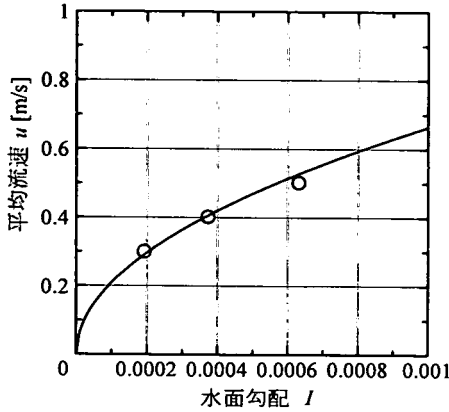


図-9 固定床における水面勾配と平均流速の関係

式(1)を変形すると

$$\ln\left(1 - \frac{Z}{Z_0}\right) = -\lambda t \quad (2)$$

となり、式(2)の左辺が時間 t に対して直線となる。直線性(相関)の最も高い Z_0 及びそのときの傾き λ を求めたところ、図-8に示した曲線が得られた。また、各ケースの最大洗掘深 Z_0 及び λ として、表-2の値が得られた。

4. 既往の研究成果との比較と洗掘速度の定式化

(1) せん断応力の評価

本実験を実施する前に、移動床部にコンクリートブロックを敷き詰め、三面コンクリート製の固定床水路として側壁の粗度評価を行った。水深は移動床実験と同じ25cmとし、3種類の流量で水面勾配を計測した。実験条件と結果を表-3に総括する。

水路床が水平なので完全な等流とはならないが、計測区間(10m)での水位差は2~5mm程度であり、上下流で断面積の変化はほとんどない。そこで Manningの平均流速公式を用いて粗度を評価する。

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (3)$$

$$R = \frac{BH}{B+2H} \quad (4)$$

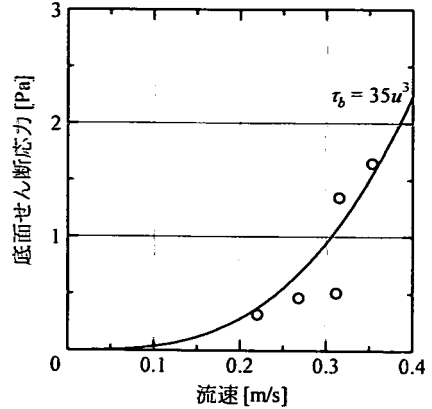


図-10 移動床における底面せん断応力と平均流速の関係

ここに、 u は断面平均流速、 n はManningの粗度係数、 I は水面勾配、 R は径深、 B は水路幅、 H は水深である。本実験では水深を一定にしているので、変数は u と I のみである。そこで両者の関係をプロットすると図-9を得る。図中の曲線は式(3)で n を0.011とした場合を表しているが、この値はコンクリート面の粗度として概ね妥当である¹⁹⁾。

一方、縦断方向の力の釣り合いは次式で表される。

$$\rho g B H I = 2 H \tau_w + B \tau_b \quad (5)$$

ここに τ_w は壁面せん断応力、 τ_b は底面せん断応力である。三面コンクリート水路の固定床実験では、 $\tau_w \approx \tau_b$ であるから、式(5)は次のように変形される。

$$\tau_w = \rho g \frac{n^2}{R^{1/3}} u^2 = \rho C_w u^2 \quad (6)$$

ここに C_w は無次元摩擦抵抗係数で、上記の結果から 2.4×10^{-3} である。一方、移動床実験では $\tau_w \neq \tau_b$ であり、次式から τ_b を求めることができる。

$$\tau_b = \rho g H I - 2 \rho C_w \frac{H}{B} u^2 \quad (7)$$

移動床実験時には、測定された水面勾配のバラツキが大きかった。そこで、本実験における τ_b と u の平均的な関係を得るために

$$\tau_b = C_b u^m \quad (8)$$

を仮定し、定数 C_b と m を決定した。その結果、図-10に示すように、 $C_b = 35 [\text{Pa} \cdot \text{s}^3 / \text{m}^3]$ 、 $m = 3$ が得られた。

ここで、固定床時のべき数2よりも大きい3となっているのは、移動床実験では流速の増加とともに泥面形状の変化が大きくなり、泥面に働くせん断応力も大きくなるためだと考えられる。

(2) せん断応力と洗掘速度

以上のようにして得られたせん断応力と洗掘速度の関係を、既往の研究とともに図-11に示す。こ

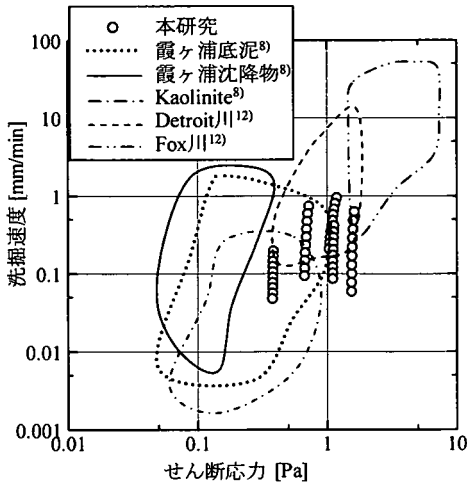


図-11 せん断応力と洗掘速度の関係

表-4 底泥別の含水比の範囲

サンプル名	含水比の範囲[%]
本研究	750-1700
Kaolinite ⁸⁾	150-300
霞ヶ浦底泥 ⁸⁾	389-675
霞ヶ浦沈降物 ⁸⁾	790-1450
Detroit川 ¹²⁾	89-124
Fox川 ¹²⁾	145-186

表-5 霞ヶ浦底泥の物性比較

項目	本研究	底泥 ⁸⁾	沈降物 ⁸⁾
採取地点	土浦沖	高浜入	高浜入
中央粒径 [μm]	11.0	11.0	17.5
粒子密度 [g/cm ³]	2.43	2.42	2.28
強熱減量 [%]	13.20	17.12	19.00

で、洗掘速度は、洗掘曲線近似式(1)の微係数から求めた。また流速は計測区間での各時刻の流水平均断面積と通水流量から計算した。泥の洗掘速度は含水比に大きく依存するので、各実験での含水比の範囲を表-4に示す。霞ヶ浦沈降物⁷⁾の含水比は本実験で用いたものに近いが、図-11ではかなり左側に位置している。また霞ヶ浦底泥⁸⁾、Kaolinite⁸⁾、Detroit川¹²⁾、Fox川¹²⁾の含水比は本実験で用いたものより小さいが、図-11ではほぼ同じ位置にプロットされる。したがって、両実験に比較して、本実験では洗掘速度が“相対的に小さい”といえる。

また、同じ霞ヶ浦の底泥でも、採取地点よる物性の違いから洗掘速度にも差が生じる可能性がある。そこで、大坪・村岡のサンプルと本研究の底泥を表-5に比較した。また図-12には、含水比別の降伏応力の測定結果を示した。これは、実験で用いた底

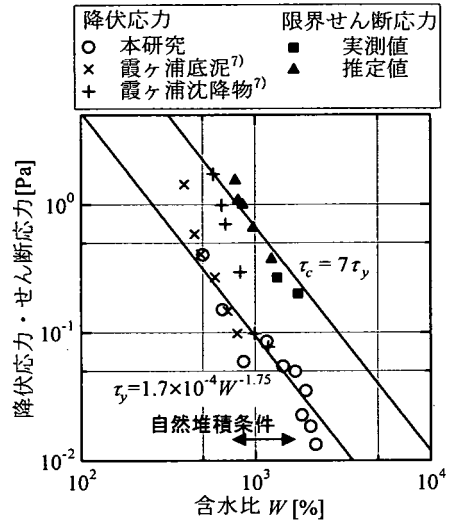


図-12 降伏応力の分析値と限界せん断応力

泥に対して粘度試験を行い、図-13に示すような流動曲線を作成し、求めたものである。測定は、二重円筒式回転粘度計 (BROOKFIELD 社製 LVDV-I+) を用い、内筒の回転数 (ざり速度) を段階的に上昇させることで行った。各ざり速度について、10秒前後でトルクが安定したことから、この値を記録し、せん断応力を求めた。このような測定を、含水比を調整した数通りの底泥に対して実施した。図-12に示されている本研究の降伏応力 τ_y [Pa] と含水比 W [%] の関係は、次の式で表される。

$$\tau_y = 1.7 \times 10^{-4} W^{-1.75} \quad (9)$$

大坪・村岡の試料と本研究で用いた底泥は、採取地点こそ異なるものの、粒径・粒子密度はかなり近い値を示している。また降伏応力も、概ね式(9)の直線上に乗っている。これらのことから (含水比を除く) 底泥の物性の差が、洗掘速度の差に及ぼした影響は小さいと思われる。

一方、前述したように、既往の研究では小型矩形管路の一部を移動床として実験を行っている。大坪・村岡⁸⁾では、幅 15cm、高さ 5cm、全長 1000cm の管路において、幅 10cm、長さ 90cm の部分を 2cm 厚さのピットとして移動床を形成している。また Jepsen ら¹²⁾では、幅 10cm、高さ 2cm、全長 135cm の管路において、幅 10cm 長さ 15cm の部分に下からピストンで底泥を押し出す形で移動床を形成している。

このような水路を用いた実験における問題は、移動床上でのせん断応力の推定が容易でないことである。大坪らの場合は、全て固定床とした予備実験での平均壁面せん断応力が、そのまま移動床にも作用

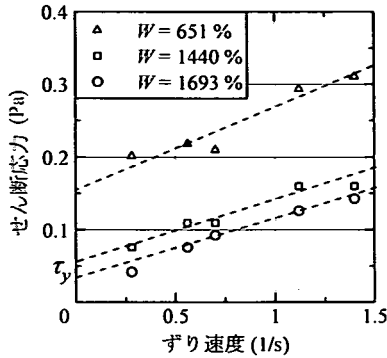


図-13 粘度試験結果の例 (降伏応力の定義)

するとしてデータ整理が行われている。また Jepsen らは、滑面管路の公式をそのまま適用してせん断応力を求めている。

これに対して本実験では、十分長い移動床部分の中央で洗掘深を計測している。また前節に記したように、移動床部分のみでの水面勾配を計測し、側壁せん断応力を差し引くことにより底面せん断応力を推定している。

実験の形式が異なるので、本実験と既往の実験のどちらが妥当であるかを性急に結論することはできない。しかし上述の理由から、本研究で提示した「単純で大型の実験水路」により得られた結果の方が、実際の現地における状況に近いのではないかと、筆者らは考えている。

(3) 洗掘速度の定式化

Jepsen ら¹²⁾と Roberts ら²⁰⁾は、洗掘速度 E を底面せん断応力 τ と見かけ密度 (bulk density) ρ の関数として、次の経験式を提案している。

$$E = A\tau^l \rho^{-m} \quad (10)$$

ここに、 A , l , m は正の定数である。なお、見かけ密度 ρ [kg/m^3] と含水比 W [%] には以下の関係がある。

$$\rho = \frac{\rho_w \rho_s (W + 100)}{\rho_s W + 100 \rho_w} \quad (11)$$

ここに、 ρ_w と ρ_s はそれぞれ水と泥粒子の密度である。

そこで、本実験の結果を同様の考え方で整理してみる。ただし、式(10)は物理的にやや不合理な面を有している。一つは限界状態が考慮されていないことである。先に示したように、含水比がかなり大きな底泥でも、ある流速までは全く動かない。すなわち「限界掃流力(τ_c)」が存在する。したがって、式(10)の τ は $(\tau - \tau_c)$ とした方が物理的に妥当であると考えられる。いま一つの問題は、密度として「実密度」が使用されている点である。 ρ が ρ_w に漸近した

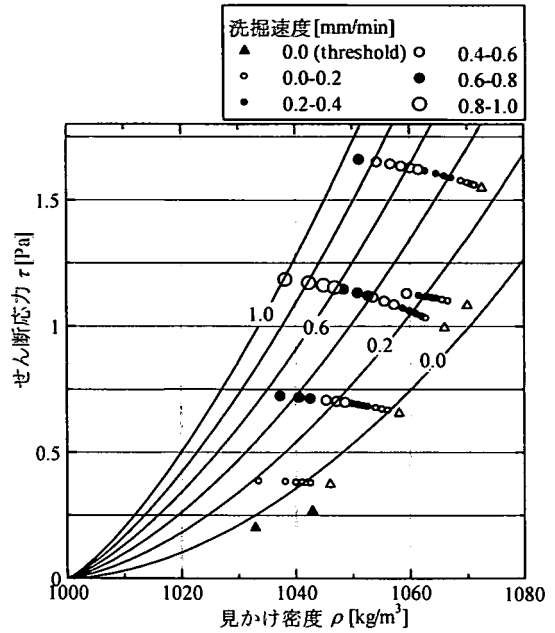


図-14 洗掘速度と見かけ密度・せん断応力の関係

極限 (つまり泥濃度が非常に小さい場合) を考えると、無限小の有効せん断応力でも洗掘は生じるはずである。以上のことを考慮し、本論文では、次の式形を想定して実験データを整理する。

$$E = \alpha (\tau - \tau_c)^\beta (\rho - \rho_w)^\gamma \quad (12)$$

ここに、 α , β , γ は正の定数である。

関根ら¹⁶⁾は、式(12)と同様の考え方で、粘性土の洗掘速度式として

$$E = a(u^* - u_o^*) (R_{WC} - R_{WC}^*) \quad (13)$$

によりまとめている。ここに、 a は定数、 u^* は摩擦速度、 R_{WC} は水含有率、 u_o^* および R_{WC}^* は定数である。この式では、限界掃流力に対応する u_o^* が泥の物性に依らない定数として扱われているが、限界掃流力は泥の物性 (特に含水比) により変化すると考えられる。また R_{WC}^* の物理的な意味に曖昧な点がある。

限界せん断応力 τ_c は、含水比 (または見かけ密度) に依存すると考えられる。また、ビンガム塑性体的な挙動を示す底泥は、降伏応力が洗掘限界についての特性を示しているものと考えられる⁷⁾。

そこで降伏応力 τ_y と限界せん断応力 τ_c の関係が議論されてきている。Migniot²¹⁾は、 $\tau_y < 1.5[\text{N/m}^2]$ のときは、限界せん断応力は降伏応力の 0.5 乗に比例し、 $\tau_y \geq 1.5[\text{N/m}^2]$ のとき 1 乗に比例するとしている。大坪・村岡⁷⁾は、二つの限界条件 (流送限界と破壊限界) を提案しており、それぞれ降伏応力の 0.56 乗、0.94 乗に比例するという結果を得ている。このよう

に既往の実験成果では、限界せん断応力が降伏応力のべき乗に比例するとされることが多い。しかし、対象とする泥や外力の条件などによりべき数や係数が異なっている。また、Kranenburg and Winterwerp⁵⁾は、モデル化の結果として、限界せん断応力と降伏応力が等しくなることを結論づけている。

一方、本研究では3(1)節で求めた洗掘開始の限界流速に加え、3(2)節で得られた終端限界洗掘深が得られている。これを次の様な考え方でせん断応力に換算して、図-12に▲印でプロットした。各洗掘深に対応する通水断面積と流量から、断面平均流速が求められる。この平均流速を式(8)に代入し、限界せん断応力を評価した。また各洗掘深に対応する含水比は、図-5(b)に示した鉛直分布を平滑化した上で、値を読み推定した。

その結果、本実験で用いた底泥では、限界せん断応力 τ_c が、概ね降伏応力に比例しており、

$$\tau_c = 7.0\tau_y \quad (14)$$

の関係が得られた。大坪・村岡⁷⁾は、上述の二つの限界条件のうち、破壊限界を限界掃流力と考えることを提案した。これは概ね降伏応力の1乗に比例していることから、式(14)の関係も妥当だと考えられる。その結果、式(12)は次のようになる。

$$E = \alpha(\tau - 7.0\tau_y)^\beta (\rho - \rho_w)^\gamma \quad (15)$$

式(15)の3つの定数を実験データから経験的に求めたところ、以下の結果が得られた。

$$\alpha = 9.2 \times 10^1 [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{3.2} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-0.2}],$$

$$\beta = 1.0, \gamma = 1.2 \quad (16)$$

式(16)を式(15)に代入すると洗掘速度 E [mm/min]、せん断応力 τ [Pa]及び見かけ密度 ρ [kg/m³]の関係として次式を得る。

$$E = 9.2 \times 10^1 (\tau - 7.0\tau_y)^{1.0} (\rho - \rho_w)^{1.2} \quad (17)$$

式(17)と実験データの比較を図-14に示す。なお ρ_w は 1.0×10^3 [kg/m³]としている。図中の記号は、図の上に記した洗掘速度に対応している。また▲は限界流速実験の結果、△は先に述べた推定限界値である。含水比は、図-5に示した含水比鉛直分布を平滑化した上で、各時刻の洗掘深度に対応する値を読んだ。完全とは言えないが、洗掘速度を概ね表現することができると言えるであろう。しかし、せん断応力の評価や泥の微少な洗掘量の計測が難しいものであったため、誤差は大きい。そのため、今後も詳細な検討を要するものと考えられる。

式(17)では E が $(\tau - \tau_c)$ に比例しており、従来検討されている関係式^{22),23)}

$$E = K_1 (\tau - \tau_c) / \tau_c \quad (18)$$

と同様の結果であると解釈ができる。また、式(18)

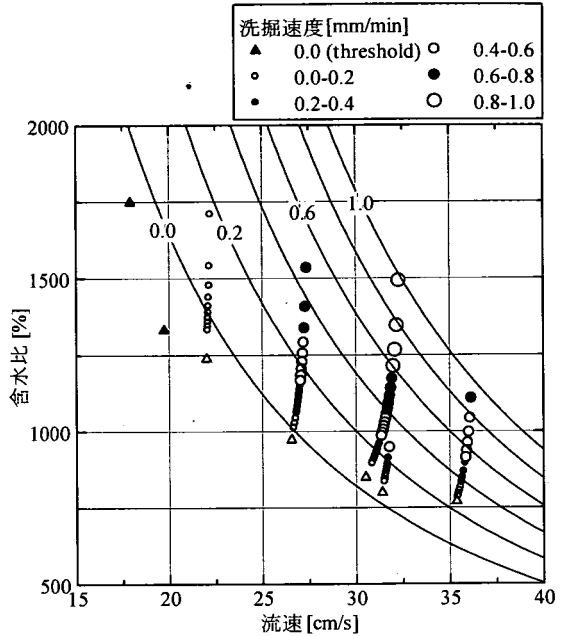


図-15 洗掘速度の測定結果と流速・含水比との関係

の $1/\tau_c$ と式(17)の $(\rho - \rho_w)^{-1.2}$ とが対応する形となっている。これは、式(9)・(14)等の関係より、限界掃流力が泥の見かけ密度の関数となることに対応する。

海田ら⁹⁾および近藤ら²⁴⁾は、せん断応力が継続的に作用すると、粒子配列が変化するために、限界せん断応力が上昇し、洗掘速度が低下することを指摘している。両者の実験は、塩水を用いたことなど、本研究の実験形式と異なる点があり、単純に比較はできないと思われる。しかし本研究では、3(1)節で述べたように、流水中に底泥の揺動が観察されており、凝集構造が変化している可能性がある。本研究では、これらの点について測定を行っていないため、確定的なことは述べられない。しかしながら、図-12や図-14に示したよう、通水(洗掘)開始直後に計測した限界せん断応力と洗掘深の時系列から推定した限界せん断応力が概ね系統的にプロットされている。このことから、通水中に生じる凝集構造等の変化による影響は、小さいものと思われる。

5. より実用的な洗掘速度の表現

移動床実験の結果は、前章のように、底面せん断応力を指標として整理されることが多い。しかし、河川と違って湖沼では、底面せん断応力の推定が必ずしも容易でないことが多い。また流動数値シミュレーションで底泥の巻き上げを検討する場合にも、

流速の出力から底面せん断応力に換算して評価することが多い。

したがって、実用的な見地からは、式(17)の右辺を断面平均流速 u [m/s]と含水比 W [%]により表現することが有用であると考えられる。すなわち、流速と含水比は、どちらも現場湖沼において比較的測定し易い項目だからである。そこで、式を変形をし、

$$E = 2.0 \times 10^2 \left(u^3 - 3.4 \times 10^3 W^{-1.75} \right) \left(\frac{2.43W + 100}{1.43} \right)^{1.2} \quad (19)$$

とした方が利用しやすいであろう。ここに、 u と τ の関係は式(8)から、 W と τ_s の関係は式(9)から、 W と ρ の関係は式(11)から、それぞれ求めている。また、式(19)中の2.43及び1.43という値は、本研究で用いた泥の土粒子密度 ρ_s (2.43g/cm³)と相対土粒子密度 $\rho_s - \rho_w$ に対応するものである。式(19)の関係をプロットすると、図-15が得られる。図-14と同様に、点が実験データ、実線が式(19)から算出される洗掘速度の等値線を示している。やはり完全とは言えないまでも、概ね等値線が実験値を説明できていると言えるであろう。

6. 結論

従来の底泥の洗掘実験は、比較的小型の閉鎖的な装置を用いて行われていた。このため、装置固有の特性の影響や移動床部分での底面せん断応力の評価において曖昧さが残されていた。そこで本研究では、砂などを用いた移動床実験と同様に、通常の直線水路を用いて洗掘実験を実施した。実験には、霞ヶ浦で浚渫されて間もない未固結泥を用いた。これを十分攪拌した後、2日ないし4日間かけて自然沈降させ、表層の状態(含水比)が現地条件に近くなるように放置後、実験を行った。また、洗掘量はスティック・ゲージを用いて直接的に計測した。

以上の実験で計測された洗掘速度は、小型の装置を用いた既往の実験結果^{8),12)}に比べて小さい値となった。実験の形式が異なることから、本実験と既往の実験結果のいずれが妥当であるかということ性を急に結論するのは適当でないが、本実験は比較的単純で簡明な方法によっていることから、少なくとも一つの事例として提示する価値はあると考えられる。

本実験で得られた限界掃流力は、ビンガム塑性体における降伏応力に比例すると考えた上で、Jepsenら¹²⁾とRobertsら²⁰⁾が提案している洗掘速度評価式を修正した式(式(12))により洗掘速度を評価した。経験定数を式(16)のように選定することにより、実

験データを概ね説明できることが明らかになった。

高含水比の底泥の洗掘速度は、水理条件に対して非常に敏感であり、またサイト毎に底泥の特性は変化するものであることから、本研究の結果が普遍的であると断言はできない。また、本研究で行った実験では比較的少量の泥を必要とするため、入手可能であった霞ヶ浦浚渫泥のみを対象として行った。さらに底泥の初期状態の設定や、含水比の鉛直分布の推定、及び実験後の泥の始末などに労力がかかるため、現段階では実験ケース数が必ずしも多くない。今後さらにデータを増やし、より総合的な検討をしていきたいと考えている。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省霞ヶ浦導水工事事務所及び財団法人土木研究センターに助力をいただいた。国土交通省国土技術政策総合研究所には、実験施設に関する便宜をはかっていただいた。独立行政法人国立環境研究所の大坪国順博士には、実験データの提供を受けた。また、査読者には本論文の論旨向上のために貴重なご意見を頂戴した。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Maa, P. Y. and Mehta, A. J. : Mud Erosion by Waves: a Laboratory Study, *Continental Shelf Research*, Vol.7, pp.1269-1284, 1987.
- 2) 鶴谷広一, 江口秀二, 鷹濱潤 : 流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究, *海岸工学論文集*, Vol.35, pp.357-341, 1988.
- 3) 山西博幸, 楠田哲也 : 振動流下における高濃度層の形成・保持機構に関する研究, *海岸工学論文集*, Vol.39, pp.286-290, 1992.
- 4) Vinzon, S. B. and Mehta, A. J. : Mechanism for formation of lutocilne by waves, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol.124, pp.147-149, 1998.
- 5) Krannenburg, C. and Winterwerp, J. C. : Erosion of fluid mud layers. I: Entrainment model, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.123, pp.504-511, 1997.
- 6) 梅田 信, 長峯智徳, 長廣 遙, 石川忠晴, 宇多高明 : 霞ヶ浦湖心部における底泥の巻き上げ過程に関する研究, *水工学論文集*, Vol.45, 2001.
- 7) 大坪国順, 村岡浩爾 : 底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究, *土木学会論文集*, No.363, pp.225-234, 1985.
- 8) 大坪国順, 村岡浩爾 : 流れによる底泥の飛び出し率, *土木学会論文集*, No.375, pp.43-52, 1986.

- 9) 海田輝之, 楠田哲也, 二渡 了, 栗谷陽一: 柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, No.393, pp.33-42, 1988.
- 10) Fukuda, M. K. and Lick, W. : The Entrainment of Cohesive Sediment in Freshwater, *Journal of Geophysical Research*, Vol.85, pp.2813-2824, 1980.
- 11) McNeil, J., Taylor, C. and Lick, W. : Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.122, pp.316-324, 1996.
- 12) Jepsen, R., Roberts, J. and Lick, W. : Effects of bulk density on sediment erosion rates, *Water, Air and Soil Pollution*, Vol.99, pp.21-31, 1997.
- 13) 関根正人, 熊谷利彦, 尾藤文人: 粘着性土の浸食機構に関する基礎的研究, 水工学論文集, Vol.43, pp.659-664, 1999.
- 14) 関根正人, 飯塚暢明, 高部一彦: 粘着性土の浸食特性に関わる諸要因の影響, 水工学論文集, Vol.44, pp.747-752, 2000.
- 15) 関根正人, 飯塚暢明, 藤尾健太: 粘着性土の浸食速度予測に向けた実験的研究, 水工学論文集, Vol.45, pp.667-672, 2001.
- 16) 関根正人, 藤尾健太, 片桐康博, 西森研一郎: 粘着性土の浸食速度に及ぼす粘着力の影響, 水工学論文集, Vol.46, pp.641-646, 2002.
- 17) Winterwerp, J. C. and Krannenburg, C. : Erosion of fluid mud layers. II: Experiments and model validation, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.123, pp.512-519, 1997.
- 18) 二渡 了, 海田輝之, 楠田哲也, 栗谷陽一: 円形回転水路とその流況特性, 九大工学集報, Vol.57, pp.431-435, 1984.
- 19) 日野幹雄: 明解水理学, 丸善.
- 20) Roberts, J., Jesen, R., Gotthard, D. and Lick, W. : Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.124, pp.1261-1267, 1997.
- 21) Migniot, P., C. : Etude des proprietes physiques de differents sediments tres fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques, *Houille Blanche*, Vol.23, pp.591-620, 1968.
- 22) Odd, N. V. M. and Owen, M. W. : A two-layer model of mud transport in the Tames Estuary, *Proceedings of I.C.E.*, 7517S, pp.175-205, 1972.
- 23) Krone, R. B. : Effects of bed structure on erosion of cohesive sediments : *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.125, pp.1297-1301, 1999.
- 24) 近藤雅秋, 平松和昭, 戸原義男, 四カ所四男美, 森健: 底泥表層部の物性と流れによる巻き上げ特性に関する研究, 農業土木学会論文集, 第 163 号, pp. 79 -86, 1993.

(2002. 8. 5 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON EROSIONAL PROCESSES OF FLUID MUD IN LAKE KASUMIGAURA

Makoto UMEDA, Fengyi GAO, Tadaharu ISHIKAWA, Satoru OTAKI and Makoto ICHIIYAMA

Erosional processes of fluid mud in Lake Kasumigaura were examined in a test flume for the sake of practical estimations of mud suspension in the lake. The mud is characterized by its high water content, higher than 1000% around its surface. As the water content is regarded as a major factor on the entrainment of mud, the vertical distributions of water content were measured with a high precision. The displacement of mud surface caused by both erosion and compression was also measured respectively in a careful way. A simple data analysis showed that the entrainment rate of mud was expressed as a function of water content of mud and flow velocity, which expression would be useful in practical ways.