

平面噴流による霞ヶ浦底泥の洗掘限界に関する 実験的研究

EROSIONAL THRESHOLDS OF FLUID MUD IN LAKE KASUMIGAURA
CAUSED BY PLANE JET

梅田 信¹・高峰一²・五味 啓²・石川忠晴³・市山 誠⁴

Makoto UMEDA, Fengyi GAO, Kei GOMI, Tadaharu ISHIKAWA and Makoto ICHIYAMA

¹正会員 博(工) (財)ダム水源地環境整備センター 研究第二部(〒102-0086 東京都千代田区麹町
2-14-2 麹町NKビル)

²学生会員 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番地)

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番地)

⁴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)

Critical conditions of bottom sediment erosion were examined in a large test flume for practical estimations of mud suspension in Lake Kasumigaura. The experiments were directed to investigate how planar jet, which brings mean shear flow and turbulent fluctuations, erodes the fluid mud in the lake.

The results of the experiments were analyzed for relationships between critical water content of the mud and a combined index of mean velocity and velocity fluctuation. A relational expression was derived using least square method. The expression simulated the experimental results of critical water content distributions quite well.

Key Words: Lake Kasumigaura, fluid mud, erosion, plane jet

1. はじめに

我が国の低平地には富栄養化した浅い湖沼が多く存在する。これらの湖には、有機物や栄養塩を多量に含んだ高含水比・高流動性底泥(ヘドロ)が堆積している。このような富栄養湖の水質改善方策として、他流域から清浄な河川水を導入することがある。本研究で対象とする霞ヶ浦においても、那珂川からの水を引く霞ヶ浦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ヘドロを洗掘することにより、湖内水質が局所的に悪化する恐れがある。そこで、放流施設的设计に当たり、現地ヘドロの耐洗掘性(洗掘限界)を明らかにしておく必要がある。

流れによるヘドロの洗掘・巻き上げ現象は、湖沼のみならず、内湾や感潮域においても、水質・生態環境に大きな影響を及ぼしている可能性があると考えられている。そのため、近年関心が高い干潟の保全などの環境問題を扱っていく上でも、このような高含水比・高流動性の底泥の洗掘過程に関する理解が望まれている。

そこで近年、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。これらの研究は、対象とする場の性質により、一方向的流れを想定したもの⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、振動流的外力を想定したもの⁽⁴⁾⁽⁵⁾、及び乱れ的外力を想定したもの⁽⁶⁾⁽⁷⁾などに大別される。

このように従来の研究では、ある一つの外力要素に着目して検討を行うことが多かった。それに対して、本研究で想定している、浅い湖沼における導水放流口付近の流れ場、すなわち静止した広い水域へ水が放出される様な流況下では、一方向的な掃流力に加え、乱流的な流速変動から生じるせん断力も同時に考慮する必要があると考えられる。

本研究では、霞ヶ浦導水口付近の状況を模擬するため、比較的大型の水槽で、現地に近い堆積条件を作り、底泥の洗掘実験を行った。工学的な観点からは、どのような水理条件下で底泥が巻き上がるかという、いわゆる洗掘限界の把握が重要である。しかし、流砂における移動限界⁽⁸⁾と同様に、底泥についても限界条件は確率的なものであると考えられる。そこで本研究では、実務的な立場から、底泥の巻き上げや河床変動が生じないことが、目

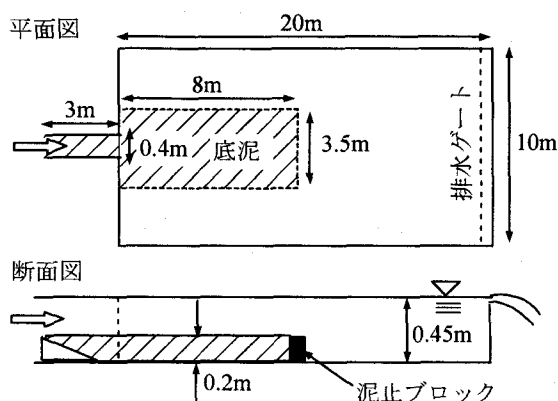


図-1 実験水槽の平面図および断面図

視により概ね確認された水理条件として、洗掘限界を決定した。

また既往研究の多くでは、例えば大坪・村岡¹⁾のように掃流力を用いて限界条件の定式化がされている。しかし、現場、特に湖沼において、湖底に作用する掃流力を把握することは、困難だと考えられる。そこで本研究では、実務上でも比較的測定のしやすい、平均流速と流速変動強度をパラメータとして、霞ヶ浦底泥の洗掘限界条件に関して検討を行った。

2. 実験方法

(1) 実験および実験装置の概要

本研究では、実験結果を現地検討に対して適用するという実務上の利用を目的としている。そこで、実験条件もある程度、現地の状況を模擬したものである必要がある。そのため実験水槽については、底泥の堆積条件の形成や水槽の水深・泥厚に対する平面スケール比などを考慮し、比較的大型のものをを用いた。

図-1に実験装置の概略を示す。水槽本体は、幅10m、奥行き20m、高さ0.6mの平面水槽である。上流端には幅0.4mの流入口があり、下流端は全面が高さ0.45mのゲートとなっている。また噴流の噴出口の上流側には、バルブから放出後の水流を安定させるため、3mの助走区間を設けてある。本実験では多量の底泥を用いることから、実験時に発生する濁水および泥の始末の問題を考慮し、実験水槽は屋外に配置した。

実験項目は、洗掘実験と同時の流速計測が難しかったため、まず水槽内の流動特性をチェックするために固定床条件で流速分布の計測を行った。つぎに、図-1の斜線で示した範囲に霞ヶ浦土浦沖より浚渫された底泥を敷き詰め、洗掘実験を行った。次節以下に各測定の方法および条件を示す。

(2) 固定床における流速計測

流速分布の計測は、表-1に示す3ケースで行った。これらの流量条件は、移動床の際に設定する噴出口流速の条件に近い値とした。また計測時の水深は、移動床実験

表-1 実験条件一覧

ケース名	測定項目	流量 [l/s]	噴出口平均流速 [m/s]
case A1	固定床 (流速測定)	25	0.236
case A2		30	0.280
case A3		35	0.318
case B1	移動床 (洗掘測定)	37	0.302
case B2		42	0.353

時に底泥を敷き詰める範囲に対して鉄板を設置し、移動床の際と同等の水深条件を作成した。

流速の測定位置は、横断方向には流入口の中心から左右にそれぞれ0.1m間隔で0~0.4mまでの0.8m幅の9測線、縦断方向には0.25mから最大2m間隔で6測線を設定し、合計54点とした。また水深方向には、測定区間における半水深(約12.5cm)の位置とした。これらの計測点に対し、電磁流速計を用いて、一分間ずつの測定を行った。

(3) 移動床実験の条件設定

本研究で用いた底泥は、土粒子密度 2.43g/cm^3 、中央粒径 $11\mu\text{m}$ (島津製作所製SALD-3000による分析結果)のような物性を持つ粒子により構成されている。しかし、底泥の耐洗掘強度は、同質の材料であっても含水比や圧密の条件によって、大きく異なると考えられる。そこで、以下の要領で底泥の初期状態を調整した。

図-1の斜線で示した範囲を仕切りで囲った上で、適量の泥を投入し、水路床から0.4mの高さまで水を満たす。この領域内で、泥が均一の懸濁液になるよう十分攪拌する。この懸濁液を48時間、放置して自然沈降・堆積させた。このように懸濁液を放置することで、表層付近の含水比が、霞ヶ浦現地に概ね近い分布が得られることが分かっている⁹⁾。これを底泥初期状態として、実験を行った。

含水比の鉛直分布の計測は、実験水槽内で直接サンプリングして計測することが困難であるため、つぎのように行った。直径30cmの容器内で、実験水槽と同様に泥を攪拌し、同じ期間で沈降・圧密をさせた。実験開始直前に、容器内の表層水をサイホンで慎重に引き抜き、これを冷凍庫で凍結させた後、調理用の皮剥き器で約1mmごとにスライスし、層ごとの含水比を計測した。

噴出口流量に関する実験条件は、表-1に示すように流量37、42 (l/s) の2ケースを行い、通水時間は、それぞれ計30分としたが、各実験において、5分または10分の通水を行う毎に、通水を中断し洗掘深計測を行った。

(4) 洗掘量の測定方法

洗掘量の測定は、図-2に示すように、1mm間隔の目盛をふった直径2mmの針金を多数取り付け付けた棒(以下「差し込みゲージ」)で行った。これを計測時に横断測線上で垂直に泥に差し込み、泥面位置の読み値によって通水による泥面の低下量を求めた。なお、この差し込みゲー

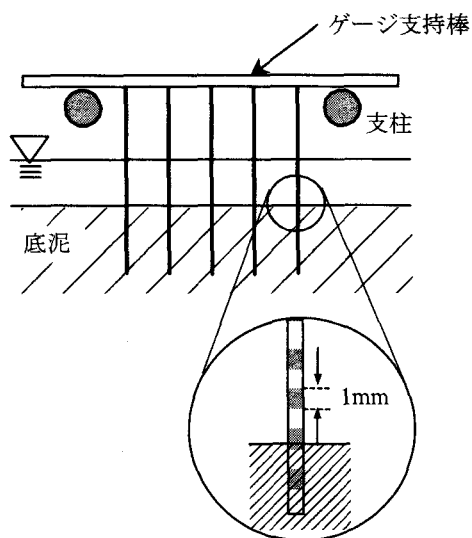


図-2 差し込みゲージの計測時模式図

ジの両端は、敷泥区間外に固定した支柱上に置くことで、計測回ごとの位置のずれを防いでいる。また、予め支柱の高度を測定してあり、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、数時間の実験中にも多少の圧密沈下が進行する。したがって、差し込みゲージで測定した泥面低下量は、底泥の洗掘量と圧密量の和であると考えられる。そこで次に述べる方法で、別途、圧密量を測定し、それを泥面低下量から差し引くことで正味の洗掘量を推定した。

比較的洗掘が少ないと予想された区域（差し込みゲージの測定範囲の外側）に、図-3に模式的に示すような装置を設置した。これは浮板に目盛り付きの短い針金（フロート・ゲージ）を取り付け、泥中に浮かせるように泥面に設置したものである。この浮板は、本実験で生じる最大洗掘深よりやや下となる深度（約2cm）の位置に浮くよう調整しており、後述する泥の含水比分布（図-5）を参考に、含水比約500%の泥とほぼ同じ密度（約1.1g/cm³）のプラスチック材料で作成した。フロート・ゲージは泥とともに沈下するので、隣接した位置に固定されている目盛り付きの針金（スティック・ゲージ）との読み値の差から圧密量を求めた。通水によってフロート・ゲージが回転したり傾いたりしないよう、板に穴をあけ、スティック・ゲージを含め3本の針金をストッパーとして差し込むようにし安定させている。このようなセットを8カ所程度に設置し、圧密量はそれらの平均値とした。

3. 実験結果

(1) 流速分布

図-4にcaseA3における流速の横断プロファイルを示す。

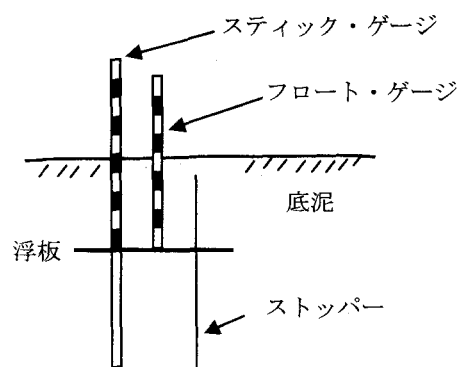


図-3 圧密沈下量の計測装置の模式図

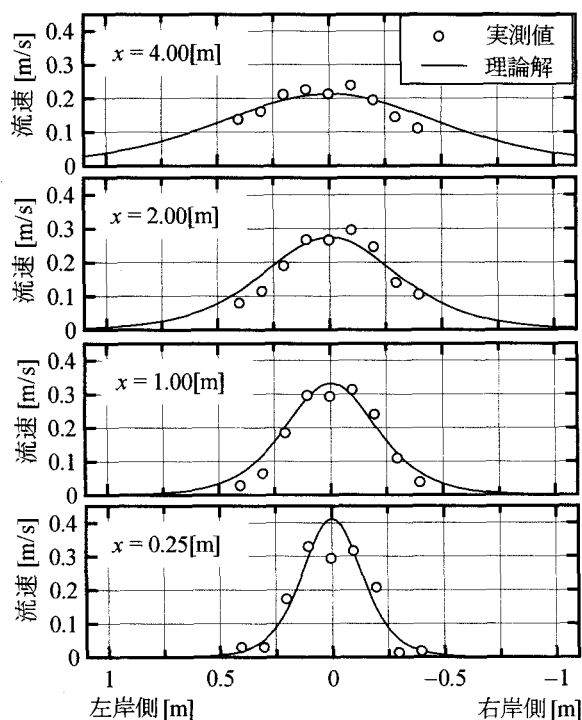


図-4 ケースA3における流速分布
(実測値と理論値の比較)

図中の○印が本実験での測定結果で、実線が境界層近似により求めた理論解である。理論解として、本研究では、

$$U = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{BU_m^2}{\sigma x}} \left(1 - \tanh^2 \frac{y}{\sigma x} \right) \quad (1)$$

により求めた¹⁰⁾。ここに、 x ：噴出方向座標、 y ：横断方向座標であり、噴出口の中心を原点に取る。また、 B ：噴出口幅、 U_m ：噴出口における平均流速、 σ ：定数（ $=1/7.67$ ）である。

なお実験では、有限幅（本実験では0.4m）の噴出口から流出するため、ポテンシャルコアの影響を考慮した仮想原点を設定する必要がある。本研究では、実測結果を参考に、噴出口幅の3倍の距離においてポテンシャルコアが消失すると仮定し、仮想原点 x_0 を求めた。その結果、 $x_0 = -1.12$ [m]が得られた。図-4の流速分布は、式(1)の x

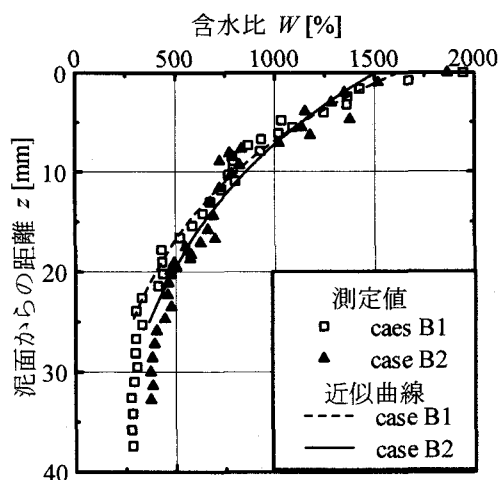


図-5 含水比の鉛直分布

を $x-x_0$ に置き換えて算出した値である。

(2) 含水比の鉛直分布

図-5に各ケースにおける底泥の含水比の鉛直分布を示す。底泥の初期条件作成のための攪拌・放置条件を両ケースで同じくしているため、含水比の分布もほぼ同様の分布となっている。

計測の際、表面付近は若干の上層水の混入が避けられなかったため、実際よりも高い値となっている可能性がある。また、表面近傍以外においても、多少のデータのばらつきが見られる。そこで、最小二乗法により指数関数で近似曲線を作成した。フィッティングの範囲を洗掘が生じた範囲に限定し、 $0[\text{mm}] < z < 20[\text{mm}]$ として行ったところ、それぞれのケースで

$$\text{case B1: } W(z) = 1616 \exp(-0.070z) \quad (2)$$

$$\text{case B2: } W(z) = 1503 \exp(-0.057z) \quad (3)$$

の関係が得られた。次章の解析では、この近似曲線による分布を利用している。

なお含水比の鉛直分布は、圧密沈下の進行により、実験中にも時間的な変化があると考えられる。しかし、フロート・ゲージによる圧密沈下量の測定結果は、case B1で0.9mm、case B2で1.5mmであり、全泥厚(20cm)に比してかなり小さかった。したがって、実験中の含水比変化も十分小さいと考えられることから、本研究では時間的に一定として扱った。

(3) 洗掘量

図-6は、case B2の中心軸に沿った測点における、洗掘量の時系列である。通水開始直後は洗掘速度が大きいのが、通水をした30分間のうちに、概ね洗掘の進行が収まっていることが分かる。したがって、通水終了時の洗掘量の計測結果は、各測点における水理条件に対する洗掘限界を示すことになると考えられる。

図-7にケースB2における洗掘量の分布を示す。この図では、各横断測線のプロファイルを下側図が上流、上側図が下流として表示している。なお、ここに示した洗掘量は、差し込みゲージにより計測した泥面の低下量か

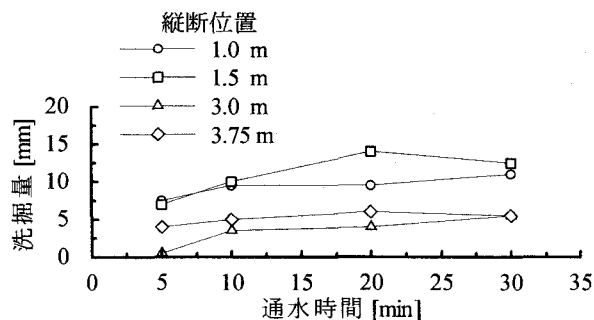


図-6 洗掘量の時間変化 (case B2)

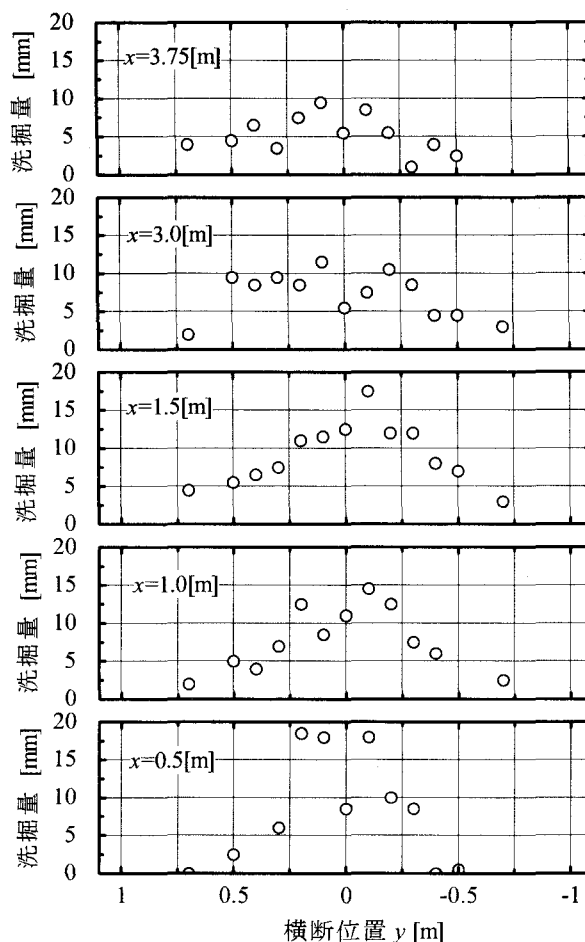


図-7 通水終了時 (通水時間30分) の洗掘量分布 (case B2)

ら、フロート・ゲージにより見積もられた泥の圧密沈下量を差し引くことにより求めた値である。圧密沈下量は、case B1で0.9mm、case B2で1.5mmと、最大で20mm弱の洗掘量に比して十分小さな量であった。

図-7に見られるように、洗掘量の測定結果は、非常にバラツキが大きかった。これには、いくつか理由が考えられる。まず、泥を比較的均一な条件に攪拌・沈降させたとはいえ、通水開始時には泥面に多少の凹凸ができてしまう。そのことが水の流動や洗掘に影響していることが考えられる。また、洗掘量のオーダーがmm単位と平

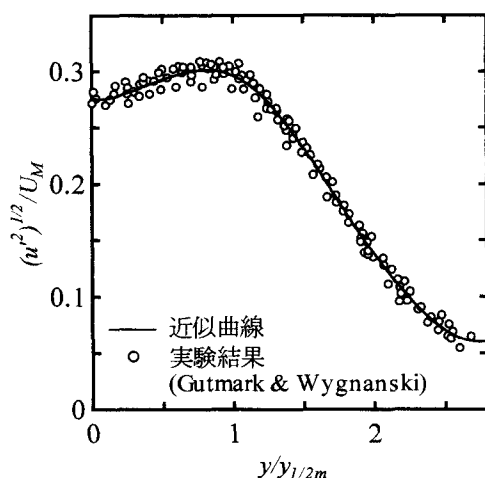


図-8 平面噴流の流速変動分布

面的なスケールに比して、非常に小さく、測定自体がかなり難しいものであった。そのような状況のため、データのバラツキが生じたものと考えられる。

4. 洗掘限界の定式化

図-4の平均流速の分布に比べ、図-7の洗掘量は、形状がある程度似ているものの、相対的に脇側の洗掘が大きくなっていることが分かる。これは、平均せん断力だけではなく、流速変動によるせん断力も巻き上げに作用しているためだと考えられる。そのため、洗掘限界の定式化は、両者の組み合わせで行う必要があると考えられる。

平均流速分布については、3. (1)節に見たように、理論値とよい一致が見られたので、式(1)から求めることとする。一方、本実験では屋外の比較的大きな実験水槽を用いている。そのため、流速の測定は、電磁流速計を用いており、流速変動強度の測定精度が十分に得られなかった。そこで、流速変動に関しては、既往の研究成果により得られている分布を利用した。ここでは、Gutmark and Wygnanski¹¹⁾の実験結果に対し、図-8に示すように、9次多項式で最小二乗フィッティングした曲線から、各点における流速変動強度を求めた。なお図-8において、 $y_{1/2m}$ ：最大流速に対する半値幅、 U_M ：軸上流速である。

洗掘限界の定式化は、次のような方針で行った。本実験で得られた洗掘深の範囲（図-7より、概ね泥面から20mm以内）において、含水比の鉛直分布は、図-5で示したように大きく変化している。底泥の耐洗掘強度は、含水比に応じて変化する（低含水比なほど洗掘が進みにくい）と考えられる¹⁾。そこで本研究では、洗掘限界の含水比 W_c を水深平均の流速 U と流速変動強度 u' の関数として、

$$\frac{1}{W_c(U, u')} - \frac{1}{W_s} = AU^\alpha + Bu'^\beta \quad (4)$$

の形式で表現することを検討した。ここに、 W_s ：泥面含

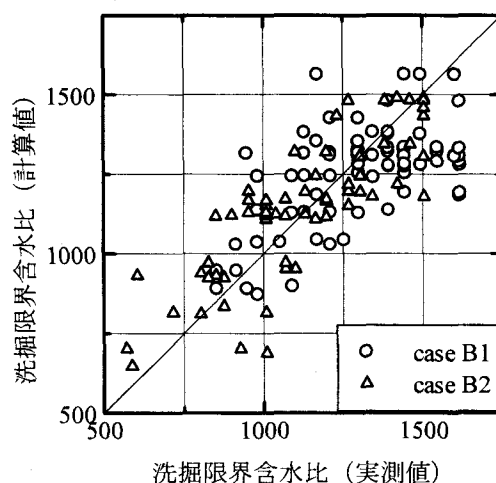


図-9 洗掘限界含水比の実測値と計算値の相関

水比、 A 、 B 、 α 、 β ：定数である。これらの定数は、以下のように、実験結果を用いて決定した。

まず左辺の W_c は、式(2)または(3)から各ケース・各測点の洗掘深に対応する含水比を算出し、 W_s も洗掘深 $z=0$ とした値により決定した。また、右辺の U 、 u' もそれぞれ式(1)および図-8から含水比と同様に求めることができる。このデータに対して、 α 、 β をそれぞれ0から10まで0.1刻みで変化させ、 α 、 β の各組み合わせについて最小二乗法を適用し、 A 、 B および相関係数を求めた。このうち、もっとも相関係数の高かった組み合わせを調べたところ、

$$\alpha=1.2, \beta=3.8, A=6.85 \times 10^{-4}, B=1.91 \quad (5)$$

が得られ、図-9の様な相関であった。

洗掘限界の含水比を実験値と式(4)、(5)による計算値とで比較すると、図-10のようになる。実験値については、かなりばらつきが大きいものの、台形の形状の横断含水比分布が流下とともに広がっている様子がよく再現されている。

5. おわりに

本研究では、霞ヶ浦底泥を対象として、静止した水域へ放出された流れ（噴流）に対する洗掘限界条件を調べる実験を行った。本研究の目的の一つに、現地における実務上の適用性ということがある。そこで、実験条件の設定には、底泥の堆積状況・含水比などに関して、現地状況に近づけるような手法を採った。

洗掘限界の定式化についても、現地計測が行いやすい物理量を指標とすることを考慮し、洗掘限界の含水比を平均流速と流速変動強度の組み合わせで表現した。このような定式化を行えば、例えば流動シミュレーションとの組み合わせた検討を行う際にも、比較的容易にシミュレーションモデルに組み込むことが可能である。

しかしながら、底泥の初期状態の設定や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

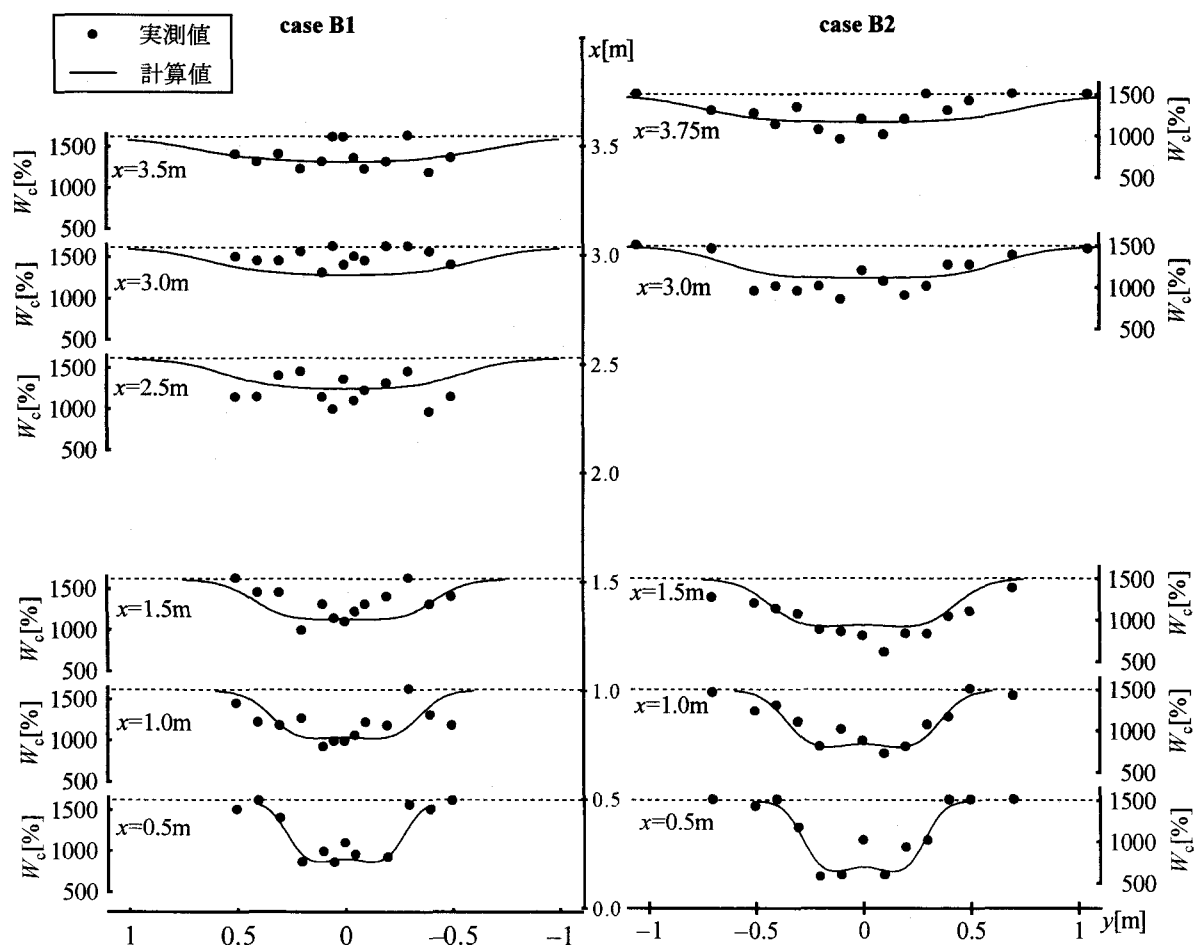


図-10 洗掘限界含水比の分布 (実測値と計算値の比較)

が必ずしも多くない。また、本研究で得られた相関式自体も、普遍的なものであると言うよりも、現地固有のものであると思われる。そのため、流況や底泥の状態などが異なる湖沼においては、またその現地に応じた方法で実験や現地観測を行っていく必要があると考えられる。

このように現場に応じた評価のノウハウを蓄積していくことで、現地フィールドのより詳細な把握が可能となり、また環境アセスメントなどのより正確な実施ができるものと考えられる。

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。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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, 363, pp.225-234, 1985.
- 2) 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, 393, pp.33-42, 1988.
- 3) 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.

- 4) Maa, P. Y. and Mehta, A. J.: Mud Erosion by Waves: a Laboratory Study, Continental Shelf Research, Vol.7, pp.1269-1284, 1987.
- 5) Vinzon, S. B. and Mehta, A. J.: Mechanism for formation of luteocline by waves, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.124, pp.147-149, 1998.
- 6) Kranenburg, C. and Winterwerp, J. C.: Erosion of fluid mud layers. I: Entrainment model, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.123, pp.504-511, 1997.
- 7) 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, pp.1171-1176, 2001.
- 8) Einstein, H. A.: Formulas for the transportation of bed load, Trans. ASCE, No. 2140, pp. 561-597, 1942.
- 9) 梅田 信, 高峰一, 石川忠晴, 大滝 諭, 市山誠: 霞ヶ浦底泥の洗掘過程に関する実験的研究, 土木学会論文集 (投稿中) .
- 10) 例えば, 日野幹雄: 流体力学, 朝倉書店, 1992.
- 11) Gutmark, E. and Wygnanski, I: The planar turbulent jet, J. Fluid Mech., Vol. 73, pp. 465-495, 1976.

(2002. 9. 30受付)