

感潮域表層底泥の再懸濁に関する現地実験

IN SITU EXPERIMENT OF ERODABILITY OF THE ESTUARINE SEDIMENT

山本浩一¹・横山勝英²・田中晋³・熊田康邦³

Koichi YAMAMOTO, Katsuhide YOKOYAMA, Susumu TANAKA and Yasukuni KUMADA

¹正会員 博(工) 佐賀大学 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1)

²正会員 博(工) 首都大学東京 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 日本ミクニヤ株式会社 東京支店 (〒213-0001 神奈川県川崎市高津区溝口3-25-10)

Poor understanding in relation to their aggregation hampers prediction of the suspension of the estuarine sediment. In this study, *in situ* experiment of the re-suspension of the estuarine sediment was conducted in an urban estuary, the Tsurumi River, Japan. The experiment was consists of the forceful suspension of sediments by the water jet pump and measurement of the turbulence, OBS and particle diameter. As a result of the experiment, It is clarified that surface layer of the sediment is easy to suspension and their clay particles were aggregated over 40%. It is concluded that low concentration of SS in the surface mud and aggregation of the clay particles resulted to high erodability estuarine fine sediment.

Key Words: sediment, floc, mud, erodability, re-suspension and estuary

1. はじめに

河口域における底泥は河川上流から供給される懸濁物質や海域からもたらされる懸濁物質によって形成され、現場において沈降・再堆積・圧密を繰り返している。河川管理のために河口域における河道断面積の確保などを考えたとき、河床にはたらく掃流力を計算して河口域における底質の再懸濁について予測計算および評価を行う必要がある。ここで河口域底質の掃流特性の把握が必要になるが、これには現地の底泥を用いた掃流実験が必要になる。通常室内実験による把握^{1), 2)}が行われることが多い、しかしながら室内実験の場合、現地の底泥を搬送する過程で圧密が進行するため、現地と同じ状況で実験するのは困難である。そこで本研究では現地において底面剪断応力を測定しながら再懸濁試験を実施し、底面剪断応力と侵食されて再懸濁されるSS量の関係の定量化を目指した。

2. 研究方法

(1) 実験方法

a) 現地底質掃流試験

底質掃流実験は一級河川鶴見川河口で行った(図-1)。調査地点の底質はシルト・粘土で構成されている。観測は水深9mの河床表面にダイバーが掃流装置と観測装置一

式(図-2)を設置して行った。掃流装置(図-3)はベニヤ板で作成し、船上のウォータージェットから水を供給して吐き出し口から水流を与えて底質を掃流した。掃流された懸濁物質のフラックスを測定するため河床から30cmの位置に超音波流速計ADV(Nortek Vector)、同20cmの位置に多項目水質計(アレック電子AAQ1183)および現場設置型粒度分析計(Sequoia Scientific 製Lisst-100)を架台に固定して河床に据え付けた。超音波流速計は河床から14cmの位置にサンプリングボリュームがくるように設定し、データは16Hzにて有線で船上のPCに記録した。また、多項目水質計でpH、DO、濁度、蛍光強度、水温を4Hzにて船上の本体でデータを収録した。

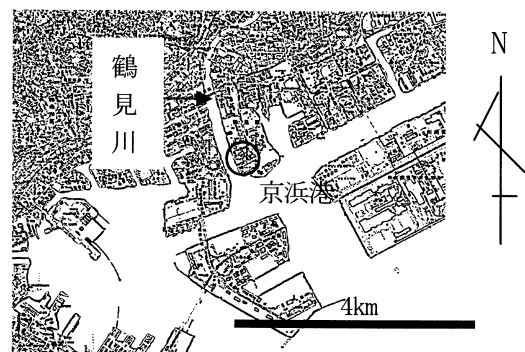


図-1 鶴見川河口 (○: 観測地点)

また, $2.5\mu\text{m}\sim 460\mu\text{m}$ の間を対数32分割した粒径の体積濃度をLisst-100で測定し, 本体のメモリーにデータを蓄積した.

b) 底質採取

現地実験が終了した直後に実験を行った場所の近傍で未擾乱の底質をアクリル管でダイバーが採取した. 船上に引き上げた後, 表層15cmを1cm刻みでスライスし, 実験室に持ち帰った. 各層の底質について超音波(周波数40kHz)で分散し, Lisst-100の付属チャンバーに底質を投入して粒度分布を取得した.

フロックについてはフロック密度関数を調べるために透明なアクリル板でフロックを観察する角管を作成し, 一定温度に調整された水槽内にパイプを入れて懸濁液を静かに滴下し, 横から動画撮影機能付きデジタル顕微鏡(キーエンス社VHX-100)で映像を取得・画像解析した(図-4).

(2) 解析方法

a) 乱流特性値の算出

ADVの観測においてはx方向を噴射方向, z方向を鉛直上向きとした. 平均流速は16Hz, 10秒間(=160データ)の流速データの平均値である. 主流方向流速を u , 直交する水平流速を v , 鉛直上向きの速度を w とし, 平均流速をそれぞれ $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ とすると, 各方向の乱流成分 u', v', w' は $u' = u - \bar{u}$, $v' = v - \bar{v}$, $w' = w - \bar{w}$ として求めた. 全乱流エネルギーTKEは

$$TKE = 0.5(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'})^{0.5} \quad (1)$$

として求めた. 底面剪断応力は粘性項とレイノルズ剪断応力RESの和で表し, τ_b を底面剪断応力, ρ を流体の密度として

$$\begin{aligned} \tau_b / \rho &= \nu du/dz + RES \\ &= \nu du/dz + (\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2})^{0.5} \end{aligned} \quad (2)$$

により表した. ここで Z_b を, 底面から流速計測位置までの高さとして $\bar{du}/dz \approx u/Z_b$ とみなして,

$$\tau_b / \rho \approx \nu u / Z_b + (\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2})^{0.5} \quad (3)$$

として近似した²⁾.

b) 底質の侵食速度の推定方法

底質の侵食速度は巻上げられた底質のフラックスから次のように算出した. ウォータージェットによる掃流によって底質の面積 S (m^2)の領域から侵食速度 $E(t)$ ($\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$)で再懸濁された底質は, 水中に懸濁して濃度 $C(t)$ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 水平速度 $U(t)$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)の懸濁物質雲

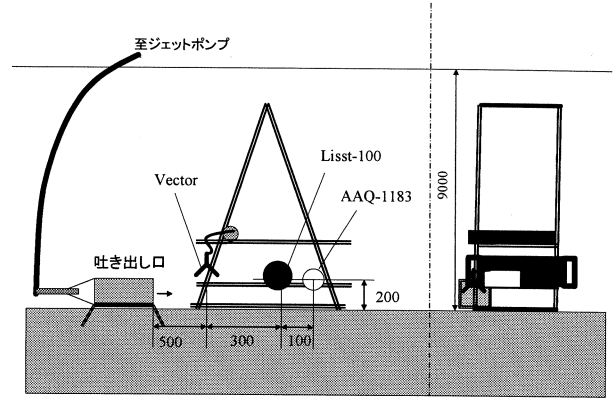


図-2 機器設置概要図(左:側面図, 右:正面図), 単位:mm

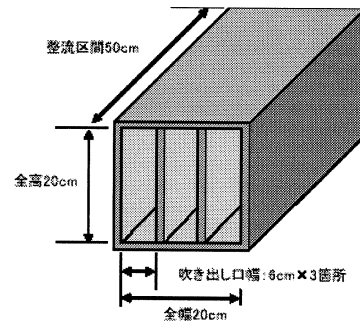


図-3 掃流装置(海水吹き出し口)

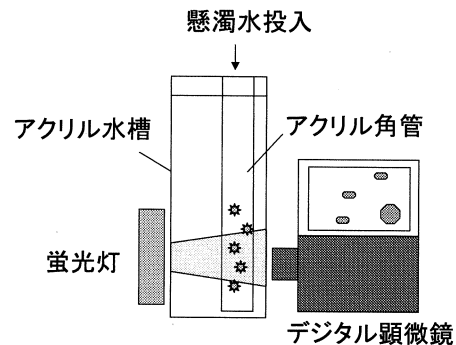


図-4 フロック撮影装置

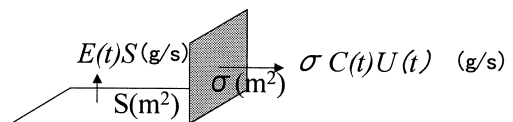


図-5 底質侵食速度の算出のためのキャリブレーションモデル

を形成して濁度計を通過するものとする。このとき、懸濁物質雲が通過する方向に垂直に仮想面積 σ (m²)を考えて、

$$E(t)S = \sigma U(t)C(t) \quad (4)$$

の関係が成立すると仮定する。モデルの概念図を図-5に示す。ここで σ は

$$M_E = \int_{t_{ni}}^{t_{end}} E(t)S dt = \sigma \int_{t_{ni}}^{t_{end}} U(t)C(t) dt \quad (5)$$

を満たすとする。ここで、 M_E ：総侵食土砂重量 (g)， t_{ni} ：掃流実験開始時刻， t_{end} ：掃流実験終了時刻である。

M_E は実験後にダイバーが測量した底質の総侵食体積と底泥のSS鉛直濃度プロファイルを用いて求めた。

3. 研究結果

(1) 流況計測結果

実験当日 (2004年11月5日) は小潮かつ満潮時であった。底面付近における流速はほとんど無かった。水深6 mの河床に掃流装置を設置し、ジェットポンプによる河床への水の噴射によって底面直上14cmの位置において最大0.3 m/s程度の流速を得ることができた。

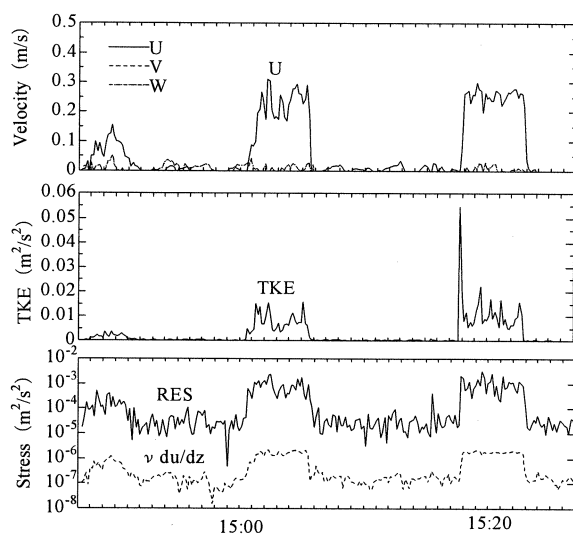


図-6 掃流実験時における流速(上), 乱流エネルギー(中), 剪断応力(下)

ジェットポンプの噴射は各5分間3回行い、その都度ダイバーが地形測量を行った。ADVによって観測された流速および乱流特性値を図-6に示す。噴射に伴ってレイノ

ルズ応力や剪断応力が增大する。剪断応力についてはレイノルズ応力項が粘性項よりも100倍程度大きく、乱流による底面剪断応力が卓越することを示している。

(2) 底質採取・地形測量結果

現地では採取された底質のSS濃度および強熱減量の鉛直分布を図-7に示す。底質表面では約300 g/L、底質の中層では約400 g/Lと密度を増していた。底質はシルトおよび粘土で構成され、砂分は認められなかった。強熱減量は表層部で15%程度と多く、有機物が豊富なことを示している。

ダイバーによる測量によって得られた掃流実験現場の侵食土量を表-1に示す。1回目の噴射後は底質の表面が薄く削れただけであったので測量が不可能であった。確実に測量できたのは2回目の噴射後であったので、これを基準に(5)式における仮想面積 σ を求めたところ、0.49 m²が得られた。1回目と3回目の噴射回次の侵食土砂体積は(5)式からの推定値である。

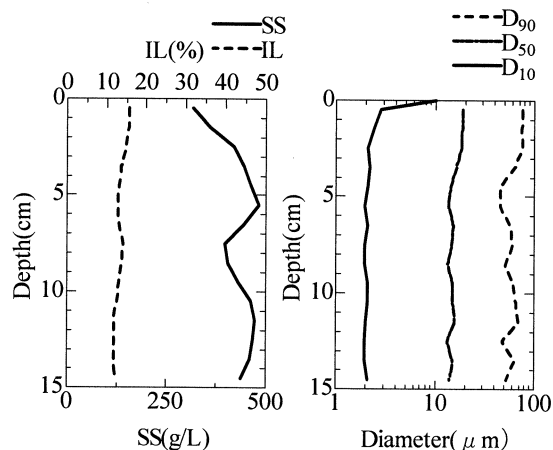


図-7 底質の懸濁物質濃度(SS)・強熱減量(IL), 代表粒径(10%粒径, 50%粒径, 90%粒径)の鉛直分布

表-1 掃流実験により侵食された土砂量と侵食面積

噴射回数	侵食土砂体積 (cm ³)	侵食土重量 (g)	侵食面積 (cm ²)
1	5.4×10 ² *	2.0×10 ² *	3.6×10 ³
2	1.8×10 ³	6.6×10 ²	7.1×10 ²
3	2.7×10 ² *	3.4×10 ² *	8.0×10 ²

*推定値

(3) 再懸濁試験による侵食量の解析

LISST-100によって観測された透過光から換算したSS濃度, SSフラックス, 累積侵食量を図-8に示す。ジェットによる噴射によって底質が再懸濁され、SS濃度が上昇していることが分かる。底面剪断応力は一定値を得ることが困難であったため、累積底面剪断応力と累積底質侵食量の関係を解析する。実験初期は累積の底面剪断応力

に対して比較的良く侵食されていることがわかるが、実験後半はやや侵食されにくくなることがわかる。この関係を明らかにするために $t_i \sim t_{i+1}$ の時間間隔において再懸濁係数 k_i ($\text{g m}^{-2}\text{Pa}^{-1}\text{s}^{-1}$)を導入した。この量は単位底面剪断応力あたりの再懸濁速度という物理的意味を持つ。

$$k_i = \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} E dt}{\int_{t_i}^{t_{i+1}} \tau_b dt} \quad (6)$$

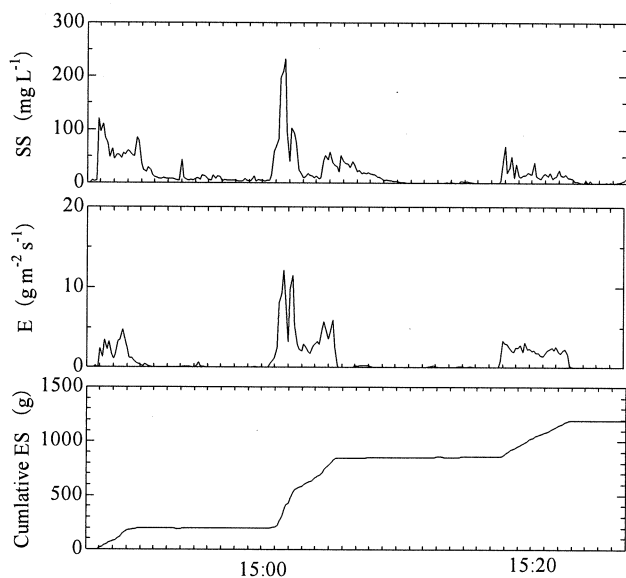


図-8 実験時におけるSS濃度, 侵食速度, 累積侵食量(2004年11月5日, 鶴見川)

一方、底質表面からの再懸濁した底質の深さ D_i は $SSC(D_i)$ を、深さ D_i 底質の懸濁物質濃度 (mg/L) として以下のように算出した。

$$D_i = \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} E dt}{SSC(D_i)} \quad (7)$$

再懸濁定数 k_i と D_i の関係を図-9に示す。底質表面では同じ剪断応力に対して侵食されやすい、すなわち同じ累積剪断応力に対して底質表面が侵食される量が深部の5~6倍になっていることが分かる。底質の深部になるほど侵食されにくい特性をもっていることが明らかになったが、 k は底質の乾燥重量濃度(SS濃度)と負の相関があり(図-10)、SS濃度から k_i を推定することができる。本実験の条件では、

$$k = -3.27 SSC + 15.4 \quad (8) \\ (R^2 = 0.993)$$

が得られた。すなわち表層底泥では、底泥のSS濃度(=乾燥重量濃度)が低いほど再懸濁しやすいことがわかった。底質が形成されてから時間が経過し、より圧密が進行した段階では再懸濁しにくくなるといえる。

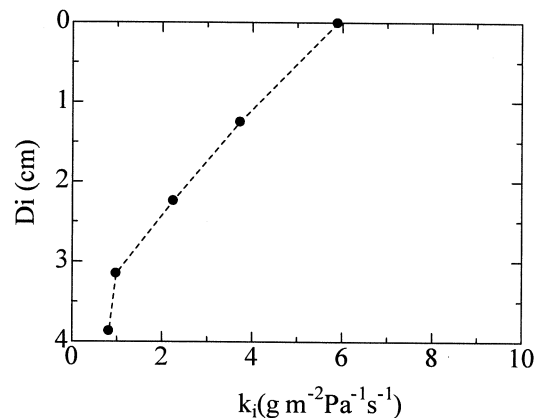


図-9 実験時における定数 k_i と侵食深 D_i の関係(2004年11月5日, 鶴見川)

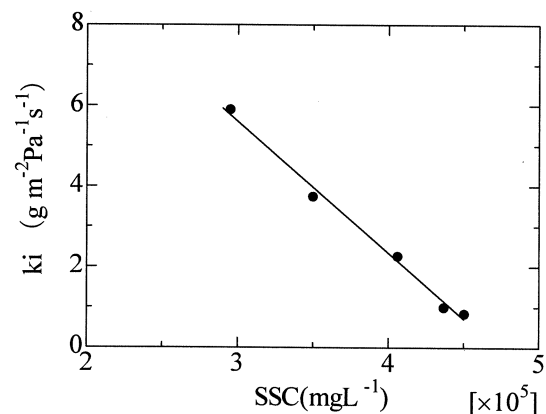


図-10 実験時における底質の各層のSS濃度(SSC)と再懸濁係数 k_i の関係(2004年11月5日, 鶴見川)

(4) 底質表面におけるフロックについて

底質の表面にはごく薄く懸濁物質が凝集した泥分が存在している。しかし、底質を採取して水上に引き上げて底質をスライスする段階では正確な状況を把握することは難しい。そこで、実験時に再懸濁された懸濁物質の粒度分布を解析し、底質の表面での凝集状況について検討を行った。

底質中の懸濁物質は圧密により、少なからず凝集している。鶴見川における第一回目の掃流試験時に取得された懸濁物質の粒度濃度分布と、超音波により表層底質を分散させた後の粒度分布を比較した。超音波による分散の結果、フロックの破壊によって粒径 $5\mu\text{m}$ 未満の粘土粒子が増加することがわかる(図-11)。

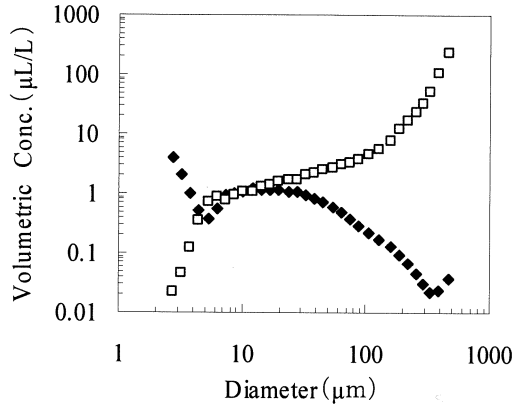


図-11 第1回目の掃流実験時に観測されたSSの体積濃度分布 (□)と超音波による破碎後(◆)における鶴見川河口表層底質のSSの体積濃度分布(Lisst-100により取得)

水中の懸濁物質は、もともと単粒子で存在しているものと、フロック化して存在しているものに分けることができるが技術上これらを分離することが困難である。したがって本検討においては、フロックは粘土粒子によって構成されたものが主であるとして以後の解析をすすめる。

懸濁物質が凝集している割合をフロック率 α_f (%)として下記で定義する。

$$\alpha_f = \frac{\int_{a_c}^{a_{\max}} W_F(a) da}{SSC} \times 100 \quad (9)$$

ここで $W_F(a)$: 粒径 a のフロックの重量濃度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) , SSC : 懸濁物質濃度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) , a_c : 粘土粒子の最大粒径 ($=5 \mu\text{m}$) , $a_{\max}$: 最大フロック径 (μm) である。 $W_F(a)$ は (10) 式で示される。

$$W_F(a) = \frac{\rho_e(a)\rho_s}{\rho_s - \rho_w} V_F(a) \quad (10)$$

ここで、 ρ_s : 単粒子の懸濁粒子の密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) , $\rho_e(a)$: フロックの有効密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) , a : フロックの粒径 (cm) , ρ_w : 水の密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) である。

本研究において鶴見川では底質を懸濁させてフロック密度関数を得た結果、

$$\rho_e(a) = 1.92 \times 10^{-5} a^{-1.611} \quad (11)$$

が得られた。

ある粒径 a の懸濁粒子について、懸濁粒子全体の体積濃度を $V(a)$ 、フロックの体積濃度を $V_F(a)$ 、単粒子の体

積濃度を $V_f(a)$ とすると、 $a < a_c$ については、フロックが存在しないから

$$V_F(a) = 0 \quad (12)$$

である。しかし、 $a \geq a_c$ についてはフロックと単粒子が混在しているから、下記のように考える。

$$V_F(a) = V_{RAW}(a) - \beta V_{US}(a) \quad (13)$$

ここで $V_{RAW}(a)$: 現地における懸濁物質の体積粒径濃度、 $V_{US}(a)$: 超音波によるフロックの破壊後の体積粒径濃度、 β : 補正係数

なお、実験室で体積粒径濃度分布を測定する際に底質を懸濁させて現地で測定したときと同じ懸濁物質濃度を用いれば $\beta=1$ となる。

上記より、粘土粒子のフロック化率を求めることができる。フロック化率の算出結果を表-2に示す。巻上げ回数を経るにつれてフロック化率は減少している。すなわち、第一回目の再懸濁試験で再懸濁された底質の最表層付近の懸濁粒子のおよそ44%はフロックの状態であることがわかる。底質表面から深部ではフロック率は低くなっているが、底質の下層からはフロックを形成せずに再懸濁したか、フロックが乱流により崩壊して細粒化した可能性がある。

鶴見川河口部における底質のごく表層 (0cm) から再懸濁される懸濁物質重量の約4割はフロックの状態で再懸濁されるが、底質表面から5mmより深部ではフロックの状態でも再懸濁される重量割合は約10%前後であるとみられた。底質表面には第一回目に巻き上げられたようなフロックが堆積している。これは常に底質の表面を塩水が流動しており、常に多少の擾乱があることによるものと考えられる。底質の深部については頻繁に再懸濁せず圧密が進行しているために単粒子に近い形で再懸濁すると予想される。

表-2 試験時の懸濁物質のフロック化率 α_f と諸条件

試験 No.	時刻	LISST- 100 吸光度 (-)	換算SS濃度 (mg/L)	α_f (%)	相当底質 深度 (cm)
1	14:47:04	1.17	254.6	44	0
2	15:02:05	0.262	57.00	13	0.16
3	15:18:27	0.188	40.8	10	0.57

4. 結論

本研究では河川感潮域底泥の掃流特性を明らかにするため、現地における底質の掃流実験を行った。本実験によって得られた結果は以下の通りである。

- ・ ジェットポンプを用いて底質付近で掃流させる方法によって現地で底泥の再懸濁試験を行うことが可能であった。
- ・ ジェットポンプによる再懸濁試験では累積底面剪断応力と累積侵食速度の関係を解析して再懸濁係数 k を導入した。これにより底質の再懸濁のしやすさを定量化することが可能であった。
- ・ 再懸濁係数 k は今回の実験の範囲では懸濁物質濃度と線形かつ負の相関があった。
- ・ 再懸濁試験の結果、底質表層部は下層にくらべ侵食速度が大きいことが明らかになったが、これは底泥のSS濃度（乾燥重量に相当）が下層よりも低いためであることがわかった。
- ・ 底質の最表面には重量の約40%が凝集した懸濁物質が堆積しているとみられた。

今後の課題として、吹き出し口近傍で局所的に侵食する問題を解決するために再懸濁する底質の範囲を板などで限定して測定することでより精度を向上させることが

可能であると考えられる。また、吹き出し口を工夫して効率的な再懸濁の方法を検討する必要がある、さらに沿岸域での実験を可能とするため、深水域で行うことが可能な方法の開発が必要である。

謝辞

本研究は第一著者が国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室に在籍時に行った研究であり、末次忠司室長(当時)には有益なアドバイスをいただいた。また、京浜河川事務所調査課には現地での試験の機会を提供していただいた。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) D.G. Lintern, G.C. Sills, N. Feates, W. Roberts:(2002) Erosion properties of mud beds deposited in laboratory settling columns , *Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment*, Elsevier Science, pp. 343-357
- 2) V.Nikora, D.Goring and A.Ross (2002): The Structure and Dynamics of the Thin-Near-bed Layer in a Complex Marine Environment: A Case Study in Beatrix Bay, New Zealand, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 915-926