

利根川河口堰下流部における 潮汐流動に伴う微細粒子の運動

FINE SEDIMENT DYNAMICS INDUCED BY TIDAL FLOW IN THE TONE RIVER BELOW ESTUARY BARRAGE

鈴木伴征¹・Arthur SIMANJUNTAK²・石川忠晴³・Jorg IMBERGER⁴・横山勝英⁵
Tomoyuki SUZUKI, M. Arthur SIMANJUNTAK,
Tadaharu ISHIKAWA, Jorg IMBERGER and Katsuhide YOKOYAMA

¹正会員 博(工) 独立行政法人土木研究所水工研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²Centre for Water Research, The University of Western Australia
(35 Stirling Highway, CRAWLEY, W.A. 6009, Australia)

³フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

⁴Professor, Centre for Water Research, The University of Western Australia
(35 Stirling Highway, CRAWLEY, W.A. 6009, Australia)

⁵正会員 博(工) 東京都立大学講師 土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

In the Tone River Estuary, turbidity maximum (TM) is formed in the reach of 5km below the estuary barrage. The TM region is covered by fine sediment having the mean diameter of 10 μ m. The sediment repeats resuspension and deposition following the variation of flow field. Time variation of SS distribution in vertical showed almost the same tendency at many points in the TM region. This fact means that the measurement and analysis in one-dimension in vertical can be applied to investigate the sediment behavior in the region. Sediment pick-up rate obtained from the one-dimensional analysis on the budget of suspended sediment was found to have a high linear correlation with the shear velocity obtained by the log-low fitting for measured velocity profile. The critical shear velocity for resuspension was shown to be a small value of 1.8 $\times 10^{-3}$ m/s, which was the same order as the value of 'non-cohesive' sediment. It would be caused by the surface bed sediment having a high water content due to the repeating motion of resuspension and deposition.

Key Words : estuary barrage, turbidity maximum, fine sediment, pick-up rate, field measurement

1. はじめに

河川感潮域における微細粒子の特性とその挙動は長期的河床変動, 透明度, 一次生産に影響を及ぼしたり, あるいは底生生物の棲息環境を形成したり, 懸濁態有機物の分解を通して水質を変化させる等, 水域の物理的・生物化学的環境形成の重要な一因子である。

そのため河川感潮域における微細粒子の挙動はこれまで多くの研究者の関心を引き, 精力的な調査研究が進められてきた。例えばTurbidity Maximum (TM; 濁度最大域)はその代表的現象の1つであり, その主な水理学的形成機構は1960～1980年代にかけてPostma¹⁾, Festa and Hansen²⁾, Allen et al.³⁾等によって概ね明らかにされた。また近年は, 計算機の進歩に伴い数値シミュレーションモデルの開発が進められ, 実水域における

TMの発生や変動など微細粒子運動の再現も概ね可能になってきた。^{4),5),6)}

しかし今日においてもSS濃度の定量的再現性の点では十分と言えない場合が多く, この主要因の1つとして底質浮上過程の定式化が不十分であることが考えられる。例えば感潮域の底質浮上現象では $E=M(\tau/\tau_c-1)^\alpha$ (E : 底質浮上率, τ : 底面剪断力, τ_c : 底面限界剪断力, α : 浮上係数)において $\alpha=1$ が比較的良好に用いられるが, Kusuda et al.⁷⁾や三村ら⁸⁾の底泥巻き上げ実験では α は底質の状態(含水比)や流れ場の質(一方向流や往復流)によって異なる様子が見られる。また別のアプローチとして, 底質浮上を密度界面での連行現象として捉え, τ の代わりにリチャードソン数を浮上率のパラメータとして用いる研究もある⁹⁾。これらの事例は底質の浮上形式を決定するために今後さらなる研究が必要とされることを示唆しており, そのためには実水域での底質浮上過程

を詳細に把握しうる良質なデータセット(河床近傍の流速・乱れ, SSの濃度・粒径, および底質の物性等)が必要不可欠と考えられる。

以上のような背景から, 本研究ではそのようなデータセットを得るため, 2001年夏季に利根川感潮域において種々の現地観測を実施した。観測は予備調査と集中観測から成る。予備調査では底質・SSの物理特性, TMの運動特性など, 集中観測のための基礎データを収集した。集中観測では予備調査の結果をもとに観測日時・地点を決定し, 河床近傍のSS濃度と乱流構造の時間変化を詳細に計測した。

本論文では, まず予備調査によって現地の微細粒子運動の全体像を明らかにし, 次に集中観測により底質のピックアップレートと摩擦速度の関係を調べた。なお, 現地のTMについては鈴木ら¹⁰⁾によって基本特性が報告されているが, 本論文では今回得られた新たな知見に基づいて運動特性を整理し直している。

2. 対象水域の概要

本研究で対象とした利根川河口堰下流部の平面図と代表的な横断形状を図-1に示す。図中のKPは河口からの距離を表しており, 例えば2KPとは河口から2km上流の地点を意味する。河道は緩やかな湾曲部を有するが概ね直線的である。水深は5m程度, 川幅は500-1000m, 平均河床はほぼ水平である。

河口から18.5km上流に利根川河口堰が建設されている。常時のゲート開度は堰上下流の水位条件によって調整されており, 堰下流部の水位が上流部より低ければゲートは半開され, 逆の場合は全閉となる。

鈴木ら¹¹⁾の現地観測によれば, 現地の塩水の混合形態は弱～緩混合であり, 平常時は大抵の場合, 塩水楔が堰直下まで遡上している。今回の一連の現地観測は塩水楔先端部に相当する12KP～18KPの6km区間内で実施された。

3. 予備調査

(1) 底質の物理特性

a) 粒度分布¹⁰⁾

図-2に河口堰下流部における平常時の底質表層部の粒度分布を示す。試料は2001年7月30日に, 15, 16.5, 18KPの最深部において直径5cmのコアサンプラーで採取された。採取された底質の表層3cmを試料とし, レーザー回折式パーティクルカウンター(SALD-3000:島津製作所製)によって分析した。その結果, 底質は3地点とも平均粒径 $10\mu\text{m}$ 程度のほぼ同じ分布を示し, 主に粘土とシルトで構成されていた。

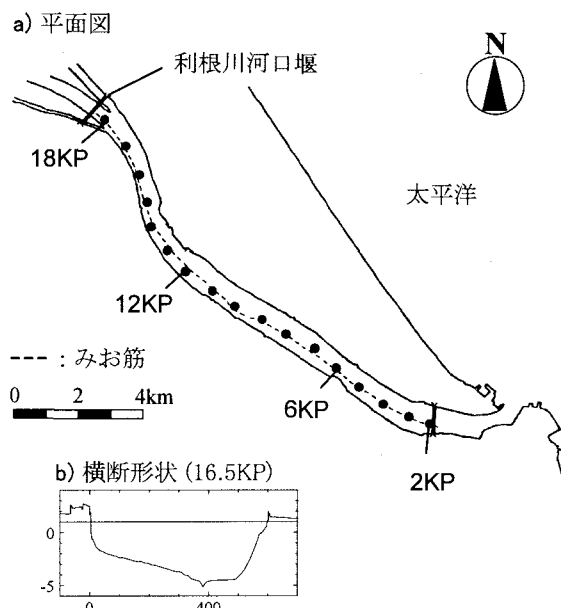


図-1 対象水域と代表的横断形状

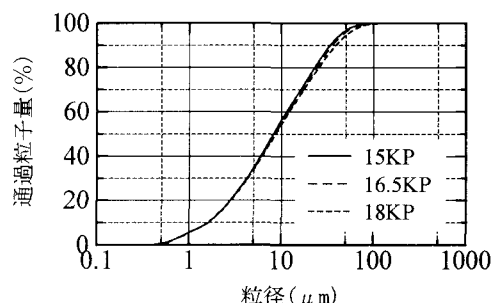


図-2 堰下流部の底質粒度分布(2001年7月30日採泥)

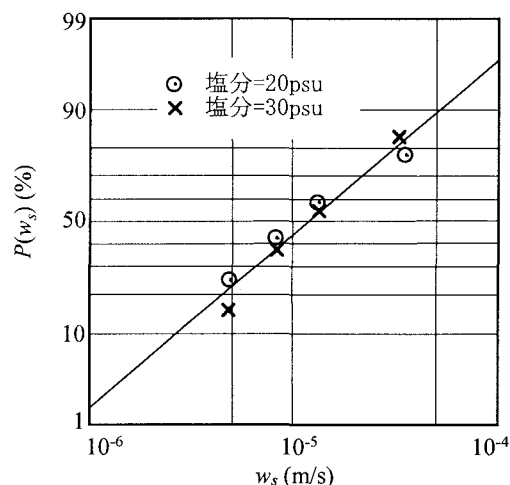


図-3 底質の沈降速度分布

b) 沈降速度

現地の典型的な塩分とSS濃度における微細粒子の沈降速度を室内実験により調べた。まず食卓塩で調整した塩水と堰直下流部で採取した底質を円筒容器内で十分攪拌し, 濁度の鉛直分布を1～2時間おきに計測した。次に計測時間・容器の高さ・円筒容器内の平均SS濃度から, 沈降速度 w_s 以下の微細粒子が全体に占める

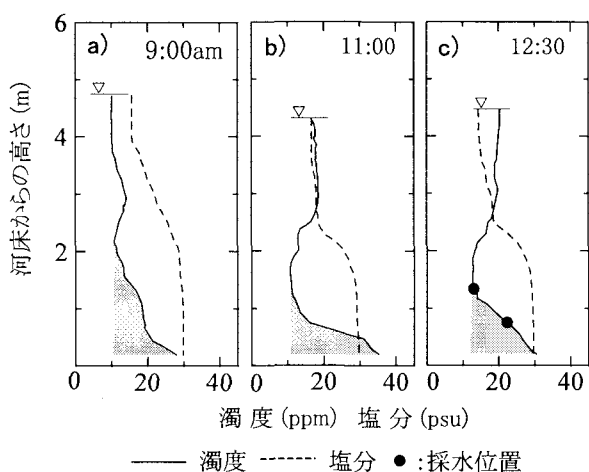


図-4 濁度と塩分の鉛直分布
(観測地点:16.5KP, 観測日:2001年8月6日)

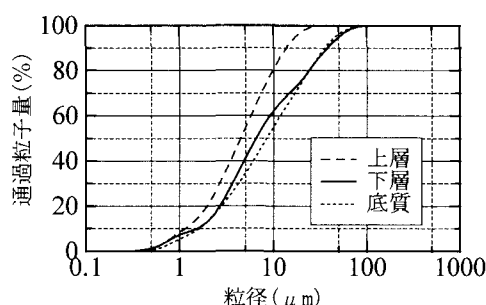


図-5 底質とSSの粒度分布の比較

割合 $P(w_s)$ を求めた。なお塩分は20, 30psu, SS濃度は60mg/lに設定した。図-3は w_s と P の関係を対数確率紙上にプロットしたものである。実験結果はほぼ一本の直線上に乗っており、対数正規分布に従った。また、平均値は 1.2×10^{-5} m/s, 標準偏差は 2.5×10^{-5} m/sであった。

(2) 河床付近における微細粒子の浮上特性

河床付近での微細粒子の浮上特性を調べるため、2001年8月6日に16.5KPにおいて濁度・水温・塩分の鉛直計測および採水を実施した。計測には多項目水質計(ACL-1183PDK:アレック電子製)を用いた。採水にはローラーポンプを用い、シリコンチューブを取付けた水質計を所定の深度まで降ろして河川水を吸引採取した。

図-4は観測結果の一部で、干潮時前後における濁度・塩分の鉛直分布である。いずれの濁度分布も河床

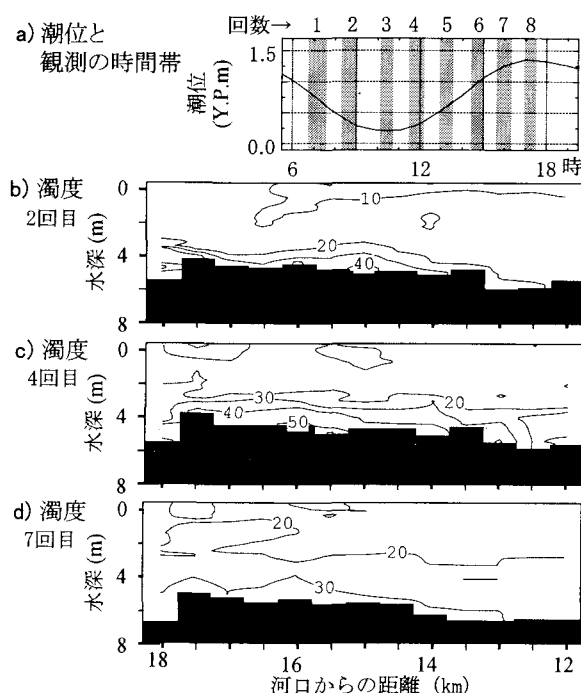


図-6 TMの発生過程¹⁰⁾(2001年8月4日観測。a)に示す8回の観測のうち2,4,7回目の濁度縦断分布のみ掲載した。2~4回目にかけて河床近傍からTMが発生している。)

付近で増加しており、灰色で塗られた三角形の領域とそれ以外の水深方向に一定の領域(以下、バックグラウンドとよぶ)の2つで構成されていると見ることができる。

そこで、図-4-c)の計測時に図中2箇所の●印の深度で採取された河川水のSS粒度分布を図-5に示す。図には同一地点で採取された底質表層の粒度分布も示した。2箇所の●は上層がバックグラウンド、下層が三角形領域に対応しており、下層のSS粒度分布は上層よりも粗く、底質の粒度分布に近かった。

以上から、現地のSS成分は2種類存在すると考えられる。1つは底質から浮上する微細粒子で図-4の三角形領域に相当する。もう1つはさらに細かい粒子で、ほとんど沈降しない。これはバックグラウンド領域に相当する。

(3) Turbidity Maximumの時空間変動

微細粒子の巨視的な運動を把握するために水質・流速の長期モニタリングと縦断観測を実施した。これらの結果は冒頭で述べたように鈴木ら¹¹⁾によって既に報告さ

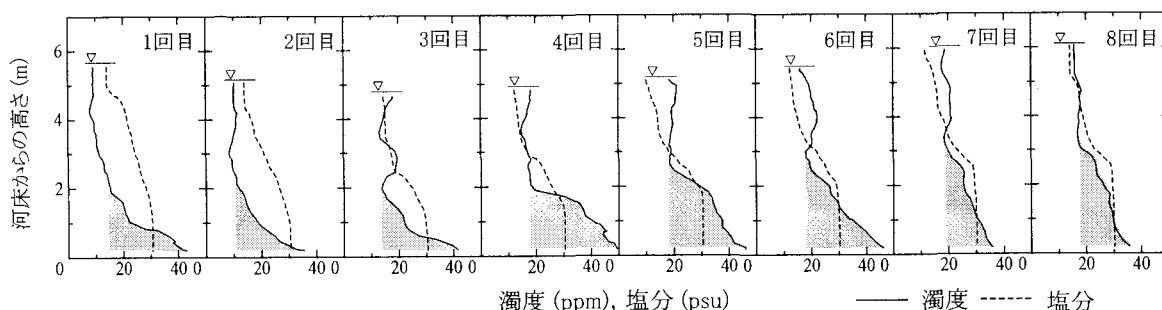


図-7 縦断観測結果の一部(16.5KPのもの。図中の1~8回目は図-6-aの観測回数と対応している。)

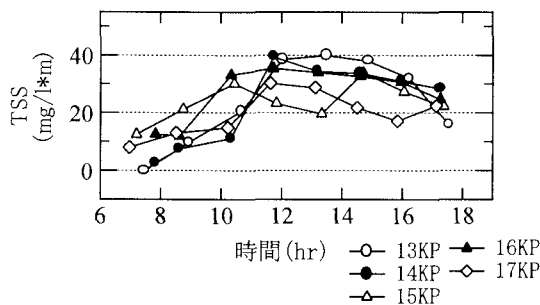


図-8 TM領域における地点別底質浮上量の時間変化

れているので、まずその要点を説明する。

a) TMの基本特性¹⁰⁾

鈴木らは利根川において2000年8月から1年間にわたって塩水楔先端部(16.5KP)の濁度と主流速の時間変化をモニタリングした結果、濁度ピークが上げ潮逆流時に周期的に生じている様子を捉えた。次にその結果をふまえて2001年8月4日(大潮)に12～18KPにおいて8回の水質縦断観測を実施した結果、図-6に示すようにTMの発生過程を捉えた。以上から鈴木らは現地のTMを「上げ潮逆流時に塩水楔先端部において河床から濁質が急激に浮上する現象」と述べている。

b) TM発生領域における底質浮上特性

次に、鈴木らの縦断観測結果を用いてTMの運動特性を詳細に調べた。図-7に16.5KPの塩分・濁度の鉛直分布(8回分)を示す。これらの図は図-6-a)の各時間帯に計測されたものである。濁度分布を見ると本章(2)で述べた特徴、つまり、三角形領域とバックグランド領域を河床付近に有していることがわかる。そこで、三角形領域を面積積分して“底質から浮上した微細粒子”の総量(TSS)を求め、その時間変化を地点ごとに調べた。

図-8はTM発生区間内の5地点におけるTSSの時間変化である。なお濁度は別途実施された水質分析からSSに換算されている。その結果、TSSは15KPを除いて同じ増加傾向を示した。つまり、TM発生区間ではほぼ同じ時間帯に底質の浮上が生じたと考えられる。また同図から底質浮上の生じる時間が2時間以内であることも読みとれるが、このときの底層水の移動距離は塩水層の平均的な逆流速(0.1m/s程度)から1km以下と見積もられる。この値はTM発生区間長の4kmよりも十分短い。よって、浮上した微細粒子が移流により河道方向に広がった影響は小さいと考えられる。

以上から、現地のTMは塩水楔先端部に発生する鉛直1次元性の強い現象と言える。

4. 集中観測

予備調査の結果、現地の微細粒子運動は鉛直1次元的な観測や解析によって把握できると考えられる。そこで集中観測では定点での詳細な鉛直計測により底質

の浮上現象を調べた。

(1) 観測方法

観測地点はTM領域中央部の16KPとした。流心部に漁船をアンカーで固定し、下げ潮～満潮にかけて水質と流速の鉛直分布を計測した。

水質計測には前述の多項目水質計を用い、5～15分おきに塩分・水温・濁度を計測した。鉛直方向の計測間隔は0.1m以内である。

流速計測にはADCP (Work Horse 1200kHz : RD-Instrument 社製)および西オーストラリア大学CWR (Center for Water Research)で開発されたPFP¹²⁾ (Portable Flux Profiler)の2種を使用した。ADCPにより流れ場全体の変動を、PFPにより河床近傍の詳細な流速分布を調べた。ADCPは舷側に固定され、河床より0.8m上方から水面付近までの平均流速の鉛直分布が計測された。PFPはレーザードップラー流速計(LDV)と高精度の水温・電気伝導度・圧力センサー等が装備されており、本体を0.1～0.2m/sの速度で水面から沈降させることで塩分・水温・流速(3方向)の鉛直分布が計測される。サンプリング周波数が100Hzあるため1～2mm間隔で鉛直分布が計測され、微細な乱流構造を把握できる。PFPによる計測は1～2分間隔で実施された。

(2) 観測時の流況

集中観測は2001年8月17, 19, 21日の大潮に実施された。しかし、最初の2日は計測器の故障や天候不良のため中断され、最終日のみ有効なデータセットを得ることができた。

図-9に8月21日観測時の流況を示す。図-9-a)は潮位と堰放流量である。干潮は12時頃で、9時～16時にかけて河口堰から200～400m³/sの放流が行われた。図-9-b)は観測された塩分の鉛直分布の時間変化である。塩水層の厚さは干潮に近づくにつれて薄くなり1m程度まで減少した。その後、上げ潮になっても塩水層厚は回復しなかったが、これは堰からの放流が塩水楔の遡上を妨げたためと考えられる。図-9-c)はADCPによって計測された主流速の時間変化である。図中、灰色部分は逆流、白い部分は順流を表す。下げ潮時、流速は全層一様に順流であり、12時頃に表層部の流速が最大に達している。その後、塩水層は逆流し始め、堰放流量の減少と共に15時半頃から全層逆流に転じた。

5. 集中観測の結果と考察

(1) 底質浮上量と底面SS濃度

8月21日の集中観測では水質の鉛直分布を49回計測した。図-10に濁度の観測結果を示す。なお、同図は前述と同様に濁度からSSに換算されている。

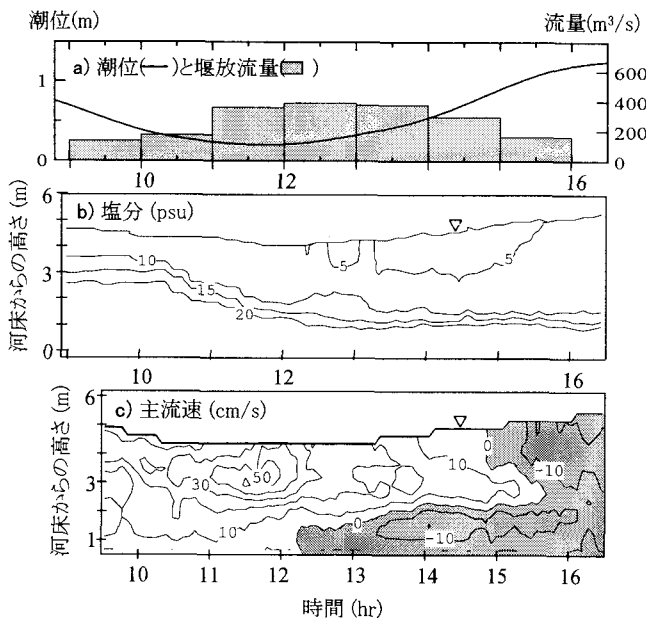


図-9 集中観測時の流況
(観測地点:16KP, 観測日:2001年8月21日)

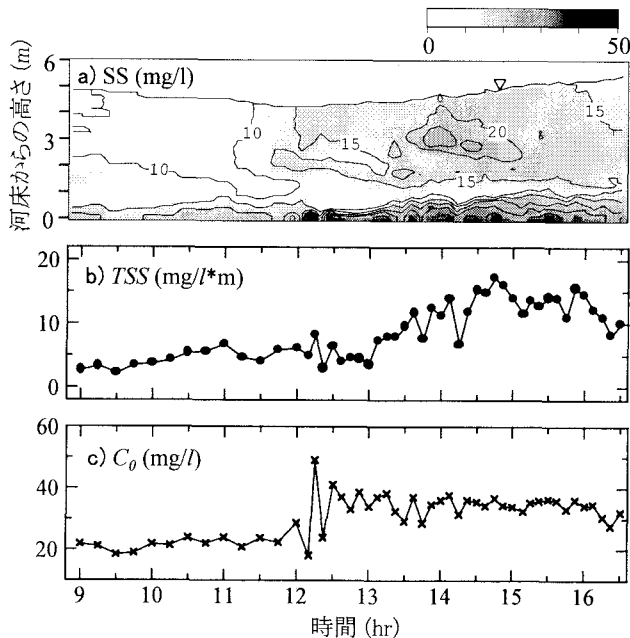


図-10 底質再浮上の様子

図-10-a)はSS鉛直分布の時間変化である。SS濃度は12時前後に塩水層が逆流に転じ始めた頃から河床近傍で急上昇している。また、12～16時においても同様の濃度上昇が間欠的に発生しており、底質浮上が確率的現象であることを示唆している。

図-10-b)にTSS(底質浮上量)の時間変化を示す。算出方法は図-8を求めたときと同様である。SS濃度の間欠的な上昇による大きな変動を無視すれば、底質浮上は順流が支配的な10時～11時と、塩水層内部で逆流が生じた13時～14時半の2回生じたと推測される。

図-10-c)は河床から2cm直上におけるSS濃度 C_0 の時系列である。 C_0 は塩水楔内部の流向が逆流になり始め

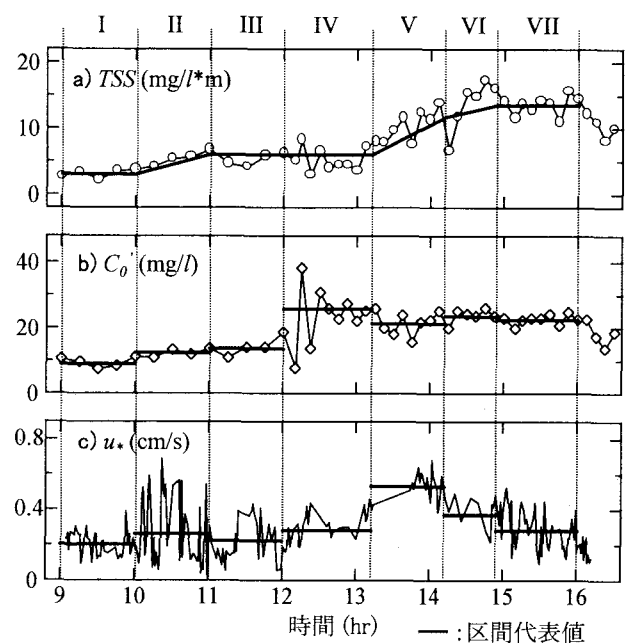


図-11 底質浮上量(TSS), 底面濃度(C_0), および摩擦速度(u_*)の比較

た12時頃にステップ的に急激に上昇した。このときTSSはそれほど増加していないが、これは高濁度層の厚さが非常に薄かったためである。

(2) 底質のピックアップレートと摩擦速度の関係

図-11に図-10-b),c)と摩擦速度 u_* の比較を示す。なお、 C_0 はバックグラウンドのSS濃度を差し引いた濃度 C_0' で表されている。また u_* はPFPで計測された流速の鉛直プロファイルをそれぞれ2cm間隔で区切って空間平均し、得られた平均プロファイルの底面近傍流速を滑面对数則に適用することにより算出された。 u_* は前節(1)において底質浮上が生じていると推測された時間帯(10～11時と13～14時半)に比較的大きな値を示している。しかし時間変動が大きく、このままでは三者の関係が明確に把握できない。そこで、これらの時系列を図のようにIからVIIで示す区間に分割して太線で示すような代表値を決め、次式で示す浮上底質の鉛直1次元保存式に代入し、各区間の底質ピックアップレートを調べた。

$$\frac{dX}{dt} = E - C_0' w_s \quad (1)$$

ここに X は単位面積あたりの浮上底質の総量でTSSを意味する。 E は底質ピックアップレート、 w_s は浮上した底質の沈降速度である。なお w_s には前述の室内実験から求められた平均速度 $1.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ を用いた。図-12に、算出された E と u_* の関係を示す。代表値から求められた E と u_* には比較的確な直線的関係が見られた。そこで最小自乗法によって求めた近似直線から限界摩擦速度 u_{*c} を求めたところ $1.8 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ となり、非粘着性粒子の u_{*c} と同オーダーとなった。一般に、本研究で対象とした

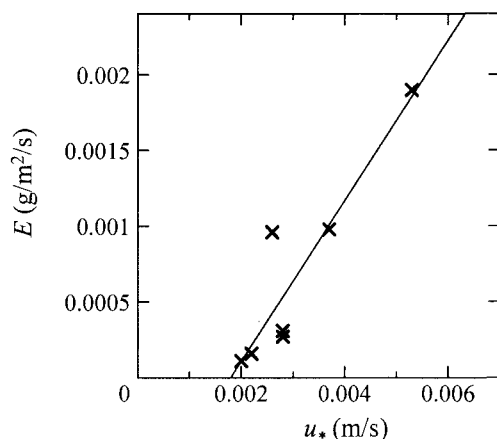


図-12 底質ピックアップレートと摩擦速度の相関

粒径程度の微細粒子は粘着力の影響が無視できず、非粘着性粒子よりもかなり大きい u_{*c} をとることが多い。本研究で求められた u_{*c} が小さい値となった理由として現地底質の含水比が高かったことが考えられる。Kusuda et al.⁷⁾の粘着性粒子の浮上実験によれば、本研究で得られた u_{*c} のオーダー(10^{-3} m/s)は含水比500~1000%の粘着性粒子に相当する。現地の底質は浮上と沈降を繰り返しているために圧密が抑制され、その結果、底質表層の含水比がかなり高い状態で維持されていたことが考えられる。

6. まとめ

利根川河口堰下流部では、堰下流部5km程度の範囲において濁度最大域(TM)が形成される。TM領域の河床は平均粒径 $10\mu\text{m}$ の微細粒子で覆われており、潮汐流動により再浮上と沈降が繰り返されている。

TM領域のSS鉛直分布の時間変化は多くの地点において同じ傾向を示した。このことはTM領域における微細粒子の挙動を調べるために鉛直1次元的な計測や解析が有効であることを示している。

詳細な鉛直1次元観測結果から算出された底質のピックアップレートは流速分布に滑面对数則を適用して求められた摩擦速度と高い一次相関を示した。一方、底質の浮上限界摩擦速度は非粘着性粒子のそれと同程度の値となった。これは、底質表層の微細粒子が浮上・沈降の繰り返し運動のために高含水比を維持しており、粘着力が弱まったためと考えられた。

なお本論文では底質浮上現象を摩擦速度との関係でのみ整理しており、河床近傍の乱流構造との関係まで言及することが出来なかった。この点については別の機会に報告する予定である。

究プロジェクト)を受けて実施された。観測を行うにあたり国土交通省関東地方整備局利根川下流工事事務所、水資源開発公団利根川河口堰管理所に多くの便宜をはかって頂いた。また東京工業大学石川研究室の学生諸氏および西オーストラリア大学CWR観測スタッフにも協力して頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Postma, H.: Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment, In *estuaries*, AAAS Publication, No.83, pp.158-179, 1967.
- 2) Festa J. F. and Hansen D. V.: Turbidity maxima in partially mixed estuaries: a two-dimensional numerical model, *Estuarine and Coastal Marine Science*, 7, pp.347-359, 1978.
- 3) Allen, G. P., Salmon, J. C., Bassoullet, P., Du Perhoat, Y. and De Grandpre, C.: Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries, *Sedimentary Geology*, 26, pp.69-90, 1980.
- 4) Lang, G., Schubert, R., Markofsky, M., Fanger, H. U., Grabemann, I., Krasemann, H. L., Neumann, L. J. R. and Riethmuller, R.: Data interpretation and numerical modeling of the mud and suspended sediment experiment 1985, *J. Geophysical Research*, 94C10, pp.14381-14393, 1989.
- 5) Wolanski, E., King, B. and Galloway, D.: Dynamics of the turbidity maximum in the Fly river estuary, Papua New Guinea, *Estuarine and Coastal Shelf Science*, 40, pp.321-337, 1995.
- 6) Brenon, I. and Hir, P. Le: Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): Identification of formation processes, *Estuarine and Coastal Shelf Science*, 49, pp.525-544, 1999.
- 7) Kusuda, T., Umita, T., Koga, K., Futawatari, T. and Awaya, Y.: Erosional process of cohesive sediments, *Wat. Sci. Tech.*, 17, pp. 891-901, 1984.
- 8) 三村信男, 田口智, 加藤始: 波による底泥の巻き上げ・沈降フラックス, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 309-313, 1989.
- 9) Kranenburg, C. and Winterwerp, J. C.: Erosion of fluid mud layers. I: Entrainment model, *J. Hydr. Engrg*, ASCE, 123(6), pp.504-511, 1997.
- 10) 鈴木伴征, 大作和弘, 横山勝英, 石川忠晴: 利根川河口堰下流部における濁質の浮上とそれに伴う酸素消費, 水工学論文集, 第 46 巻, pp. 917-922, 2002.
- 11) 鈴木伴征, 若岡圭子, 石川忠晴: 利根川河口堰下流部における嫌気水塊の運動について, 水工学論文集, 第 42 巻, pp. 769-774, 1998.
- 12) Imberger, J. and Head, R.: Measurement of turbulent properties in a natural system, In *Fundamental and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*. Hydraulics Division/ASCE, 1994.

謝辞: 本研究の一部は日本学術振興会の助成(日豪共同研

(2003. 9. 30受付)