

筑後川感潮河道における懸濁粒子の凝集・沈降フラックスに関する調査

Flocculation and Settling Flux of the Suspended Sediment at the Chikugo River Estuary, Japan

山本 浩一¹・横山 勝英²

Koichi YAMAMOTO and Katsuhide YOKOYAMA

Flocculation and deposition flux of the suspended sediment were surveyed at the Chikugo River Estuary on August 31, 2007. We clarified that the deposition rate of the suspended sediment (SS) of all particle size for clay and silt by the newly developed settling tube. Deposition rate was strongly correlated to the concentration of the SS for all particle size. The rate of the floc in the suspended sediment was estimated from the volumetric concentration of SS, SS concentration and the floc density function. The rate of the floc was decreased when the bottom shear stress was high. Around the high slack, the rate of floc in SS was increased and deposition rate was higher than resuspension rate. From the core sampling of the bottom mud, it was clarified that daily mean accumulation rate of the bottom sediment was around 0.1 m/day.

1. 序 論

筑後川感潮河道では、高濁度水塊の運動とともに流動泥 (fluid mud) が発生した際に底泥の堆積が数日間で急激に進展し、塩水遡上の流れが淀む領域において堆積が卓越することがわかっている (横山ら, 2007)。本研究では懸濁粒子の凝集・沈降および流動泥 (fluid mud) 発生の過程を明らかにするために一潮汐の観測を行い、コア採泥の結果とあわせて堆積速度の考察を行った。

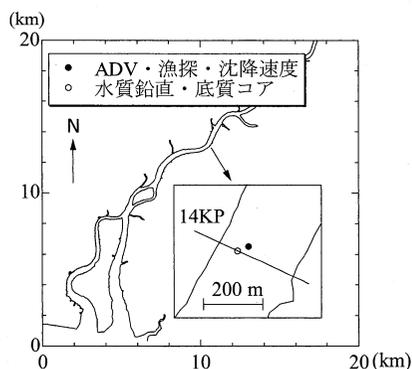


図-1 観測地点(筑後川感潮河道)

2. 観測方法

筑後川の観測地点を図-1に示す。感潮域は筑後大堰までの23kmであり、8~16kmの区間で河床材料がシルト・粘土となっている。特に14km地点で底泥の堆積が著しいことが示されており (横山ら, 2007)、本研究におい

ても14km地点で観測を行った。実施項目はSS沈降速度測定、乱流鉛直SSフラックス測定、魚群探知機 (Eagle社 FishStrike 2000c) による河床高観測、多項目水質計アレック電子AAQ-1183とSequoia Scientific社LISST-100による水質鉛直分布観測、底質コアの採取・分析である。観測日は2007年8月31日、コア採泥日は2007年11月2日である。底質コアは採取後5cm間隔に切断し、粒度分析、有機炭素・窒素の分析を行った。また、14km断面では、2007年7月、8月、9月、11月に横断測量を実施している。この結果は金子ら (2008) にまとめられている。

(1) SSの沈降速度測定方法

SSの沈降速度を現場で求めるために図-2に示す、3つの採水口が付属した沈降筒 (内径50mm) を製作した。この筒内にポンプで試料水を導入し、一定時間SSを沈降させる。まず試料水を3L/minで吸引してポンプ停止後船上に引き上げ、ただちにバルブを全閉した。採水層の水温に設定した断熱容器に入れて沈降管を垂直に保ったままSSを沈降させた。一定時間沈降させたのち、中段の採水口から沈降管の上半分 (上部カラム) の懸濁水を採水した。その後下半分 (下部カラム) の懸濁水を採水した。懸濁水試料については、SS濃度と粒度分布を得た。

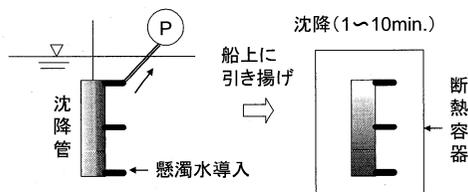


図-2 沈降速度計測方法 (P: ポンプ)

次に沈降速度の計算方法を示す。沈降管内については静穏なためSSの鉛直乱流拡散が無視できる。カラム上端を原点とし、 z を鉛直下向きにとって、ポンプ停止時

1 正 会 員 博(工)佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト
2 正 会 員 博(工)首都大学東京准教授 都市環境学部

刻をとして(1)式によってカラム内の鉛直SS濃度分布を計算した。

$$\frac{\partial C_i(z,t)}{\partial t} = w_{is} \frac{\partial C_i(z,t)}{\partial z} \quad (1)$$

ここで $C_i(t, z)$ は時刻における $z=z$ の位置における粒径 i のSS濃度, w_{is} は粒径 i のSSの沈降速度である。上部カラム下端を $z=z_1$, 下部カラム下端を $z=z_2$, T を沈降終了時間とする。沈降管内の $t=0$ における粒径 i のSS濃度 $C_i(0)$ を初期条件として与え, (1)の両辺を $t=0$ から $t=T$ まで積分すると, $t=T$ におけるカラムの粒径 i のSS濃度の鉛直分布が得られる。 $t=T$ における上部カラム, 下部カラムの粒径 i のSS濃度をそれぞれ, $C_{iT}(T)$, $D_{iB}(T)$ とおくと, それぞれ

$$C_{iT}(T) = \frac{1}{z_1} \int_0^{z_1} C_i(z,T) dz \quad (2)$$

$$C_{iB}(T) = \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} C_i(z,T) dz \quad (3)$$

となり, 沈降管の初期のSS濃度 $C_i(0)$ は,

$$C_i(0) = \frac{z_1 C_{iT}(T) + (z_2 - z_1) C_{iB}(T)}{z_2} \quad (4)$$

で得られる。既知である T , $C_{iT}(T)$, $C_{iB}(T)$ により, w_{is} を繰り返し計算で収束させて求めることができる。なお, 本計測における $z_1=186\text{mm}$, $z_2=392\text{mm}$ である。

(2) 乱流鉛直SSフラックス測定方法

調査地点の河床面上38cmにサンプリング・ボリュームが来るようにADV (Nortek社Vector)を設置した。サンプリング周波数は64Hzで連続計測した。各成分の平均値を求めるときは, 1分間の平均とし, 3840データの平均を求めた。ADVによって測定された流速から x , y , z 方向のそれぞれの流速 u , v , w の乱流成分 u' , v' , w' を算出した。これを用いて x , y 方向のレイノルズ応力 τ_{bx} , τ_{by} をそれぞれ (5) 式, (6) 式で算出した。底面せん断応力 τ_b はそれらのベクトルの和の大きさとし, 底面での値とするため, 水面で0として外挿し (7) で求めた。ここでは水深 (m) である。

$$\tau_{bx} = -\rho \overline{u'w'} \quad (5)$$

$$\tau_{by} = -\rho \overline{v'w'} \quad (6)$$

$$\tau_b = \frac{h+0.38}{h} \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (7)$$

ADVによって得られた反射音響強度はADVの近傍で測定された濁度計 (アレック電子ATU5-8M) によるSS濃度との比較によりSS濃度に変換した。すなわち濁度をSS濃度の基準とした。濁度計で測定したカオリン濁度は(10)式でSS濃度に変換した。

$$C = 6.614 \text{ Turb}^2 + 2.433 \text{ Turb} \quad (8)$$

反射音響強度とSS濃度の関係は, 10:30以前が(9)式, 10:30以後が(10)式で表された。10:30前後でフロクの平均粒径が大きく変化した影響が考えられる。

$$\text{SNR} = 12.494 \log C + 10.000 \quad (9)$$

$$\text{SNR} = 28.276 \log C - 38.934 \quad (10)$$

ここで, は懸濁物質濃度 (mg/L), SNR は反射音響強度 (dB) である。 SNR も64Hzで取得可能であるから, SNR の時系列からSS濃度変動成分 C' (mg/L) を計算できる。 J_z を乱流鉛直SSフラックス ($\text{g/m}^2/\text{s}$) とすると, 渦相関法により(11)式のように計算できる。

$$J_z = \overline{C'w'} \quad (11)$$

(3) 魚群探知機による河床高観測

魚群探知機 (Eagle社Fish Strike2000c, 周波数200kHz) を観測船に艀装して連続的に水深を観測した。水深はデジタルデータで保存した。音波は水と底泥の境界面で反射するが, 200kHzでは, 既往の研究からfluid mudの表面で音波が反射することがわかっている (中川ら, 2004) ので, 魚群探知機による河床面の変動はfluid mud表面の高さを捉えているとみなせる。河床高 H_b (m) は魚群探知機で得られた水深を D (m), 水面標高を H_w (m), トランスデューサの水深を a (m) として下記のように算出した。

$$H_b = H_w - D - a \quad (12)$$

(4) 水質鉛直分布測定

多項目水質計 (Alec Electronics, AAQ-1183) を用いて約20分ごとに水質鉛直分布を測定した。測定項目は濁度, クロロフィル蛍光, 水温, 塩分, pH, DOである。

レーザー粒度分析計 (Sequoia Scientific, LISST-100 type. C) を用いて10分ごとにSSの粒径濃度の鉛直分布を観測した。観測可能な粒径は $2.73 \mu\text{m} \sim 462 \mu\text{m}$ である。

3. 観測結果

(1) 乱流鉛直SSフラックス・沈降フラックスの変動

図-3に筑後川14k地点におけるSSの濃度分布を示した。上げ潮時に底面剪断応力が一時的に0.7Paを超えると (図-4), SS濃度が全水深で上昇した。図-5に乱流鉛直SSフラックス J_z ($\text{g/m}^2/\text{s}$) とともに沈降フラックス ($\text{g/m}^2/\text{s}$) を示した。沈降フラックスは山本ら (2008) による沈降速度 w_s (m/s) と C (g/m^3) の関係を用いて, (13)式で表現した。

$$D = w_s C = 7.6 \times 10^{-6} C^{1.5058} \quad (13)$$

図-5によると, 上げ潮初期は乱流鉛直SSフラックスが沈降フラックスを大きく上回っており, 盛んに再懸濁しているが, 満潮憩流時直前の10:30ごろ底面せん断応力は0.2Paを下回り, 沈降フラックスが乱流鉛直SSフラッ

クスを上回るようになる。このとき一気に沈降が始まった。即ちSSの沈降限界せん断応力は0.2Paであった。なお、10:00から11:00の間に0.8Pa以上から0.06Paまで底面せん断応力が急減した。

水面から底面上1mまでの水柱のSS量を積算すると、SSの総量は10:26において4618g/m²であったが、60分後の11:26までに2187g/m²まで減少した(図-6)。従って、この間に沈降したSS量は2431g/m²である。このとき魚探の観測からfluid mud表面は約5cm上昇しており、沈降したSSが全てfluid mud形成に寄与したとするとfluid mudの濃度は約48620g/m³となる。実際に13:08に底面上10cmより採水されたfluid mudの濃度は48406g/m³であって良く一致している。また、沈降フラックスを初期SS濃度826g/m³で除して沈降速度を得ると8.2×10⁻⁴m/sと計算された。これは沈降管による測定から予想される沈降速度と一致していた。懸濁物質の沈降によるfluid mud形成はただかだか5cmの河床上昇なのに対して、図-6によると河床高は干潮から満潮までの間に20cm近く上昇しており、SSの沈降のみでは説明がつかない上昇幅である。fluid mudが移流により他の地点から観測点に移動してきていることを示していると考えられる。図-7にADVによって算出した上げ潮(逆流時)と下げ潮(順流時)の底面せん断応力と渦相関法によって算出した乱流鉛直SSフラックスの関係を示した。逆流時にくらべ順流時には再懸濁しにくくなっていることがわかる。再懸濁限界せん断応力の存在は明確でない。

上げ潮時に再懸濁しやすい原因は現在不明であるが、fluid mudの存在により再懸濁様式が変化した可能性がある。上げ潮時に比べて下げ潮時に再懸濁しにくくなっているという事実自体は、感潮河道へのシルト・粘土の堆積が促進される要因の一つとなっている。

(2) 懸濁粒子の凝集・フロック化

沈降管によって求められた各粒径の沈降速度は濃度の増加により粘土からシルトまで幅広い粒径で増加した。また、各粒径のSS濃度が1000mg/Lを超えると沈降速度は減少に転じている(図-8)。Mehta(1986)は自由沈降の上限のSS濃度を3500mg/Lにおいており、これ以上のSS濃度では干渉沈降が生じ、SS濃度の増加とともに沈降速度が減少するとしている。1000mg/Lまではそれぞれの粒径で濃度が増加することにより沈降速度が増加することがわかる。このうち、粘土粒子はSS濃度10mg/Lでは10⁻⁵m/s程度の沈降速度であるが、1000mg/Lの濃度では7×10⁻⁴m/s程度になる。SS濃度の増大によって各粒径のSSについて沈降速度が増大していることから、フロック化によって沈降速度が増大していることがわかる。さらに、各粒径の沈降速度はSS濃度が増大するにつれほぼ等しい沈降速度となり、単一のフロックの中に各粒径

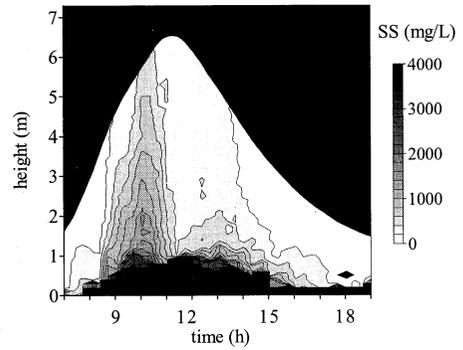


図-3 SS濃度の鉛直分布(2007年8月31日, 筑後川14K)

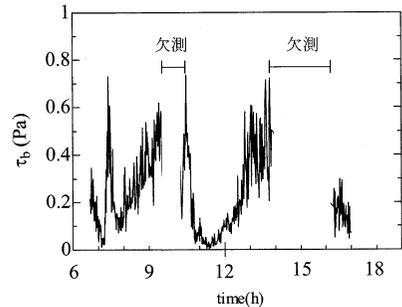


図-4 ADVにより計算された底面せん断応力τ_bの変化(2007年8月31日, 筑後川14K, 底面上38cm)

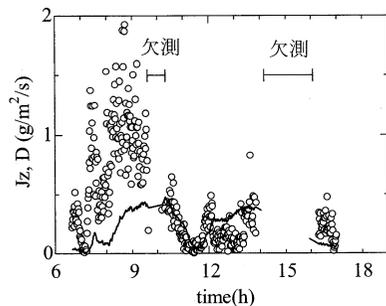


図-5 乱流鉛直SSフラックスJ_z(○)と沈降フラックスD(実線)の変動(2007年8月31日, 筑後川14K, 底面上38cm)

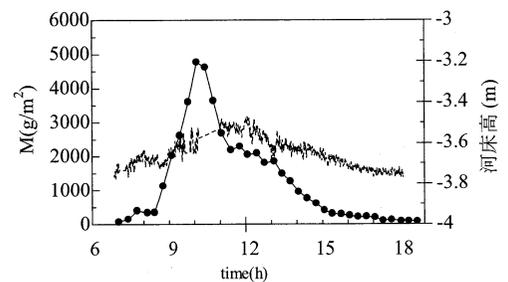


図-6 底面上1mから水面までのSSの総量M(●)の変化と河床高(点線)変化(2007年8月31日, 筑後川14K)

の粒子が混在している状況がわかる。

図-9にLISST-100により取得された体積濃度から計算した中央粒径を示す。満潮憩流時直前で急激に中央粒径が増大している。これは懸濁粒子が急激に凝集してフロック化したことを示している。なお、中央粒径が大きい状況は下げ潮になってもそれほど変化せず、干潮を迎えている。

さらにフロックの形成状況を明らかにするために、LISST-100により取得された体積粒径濃度と、採水分析により得られた粒度分布から、現地での単粒子とフロック粒子の配分を計算した。

まずフロックの限界粒径 $D_{f, min}$ の存在を仮定する。即ちLISST-100で観測したSSの粒径 D が $D < D_{f, min}$ のとき、単粒子の重量濃度が卓越し、 $D > D_{f, min}$ ではフロックの重量濃度が卓越するような粒径のことである。フロックの有効密度 $\Delta \rho_f$ は一次粒子の粒径を D_p として次のように計算される(Kranenburg, 1994)。

$$\Delta \rho_f(D) = \rho_f(D) - \rho_w = (\rho_s - \rho_w) \left[\frac{D_p}{D} \right]^{3-n_f} \quad (14)$$

$D > D_{f, min}$ については全てフロックであるとみなし、 $\Delta \rho_f$ と粒径 D の体積濃度 $C_v(D)$ を使って粒径 D のSS濃度 $C_f(D)$ を下記のように求めた。

$$C_f(D) = C_v(D) \frac{\Delta \rho_f(D) \rho_s}{\rho_s - \rho_w} = C_v(D) \rho_s \left[\frac{D_{f, min}}{D} \right]^{3-n_f} \quad (15)$$

ここで既往の研究例(Yamamoto et al., 2007)から、 n_f を採用した。採水によるSS濃度は求められているから、 $D < D_{f, min}$ のときの粒径 D のSS濃度を $\rho_s C_p(D)$ とし、SSのうち単粒子のSS濃度を C_p 、フロックのSS濃度を C_f としてこれらを合計する。ここで D_{min} はSSの最小粒径、 D_{max} をSSの最大粒径とする。 $D_{f, min}$ は、実測されたSS濃度と整合するように(16)式により求めた。

$$C = C_p + C_f = \rho_s \int_{D_{min}}^{D_{f, min}} C_v(D) dD + \rho_s \int_{D_{f, min}}^{D_{max}} C_v(D) \left[\frac{D_{f, min}}{D} \right]^{3-n_f} dD \quad (16)$$

図-10に、求められた C_p と C_f および C_f/C を示す。 C_f/C はSSのうち、フロックになっているものの割合を示している。午前9時ごろに単粒子態SSの濃度がピークに達したのち急激に濃度が減少するが、フロック態SSの濃度は9:30~10:00の間に濃度が増加している。すなわちフロックが生成している。上げ潮時の時間帯には底面せん断応力の急激な増大により底質から単粒子とともにフロックが再懸濁することがわかる。満潮時には底面せん断応力が減少すると、沈降速度の比較的速い粗粒な単粒子態SSは先に沈降してしまうが、その一部はフロックに変

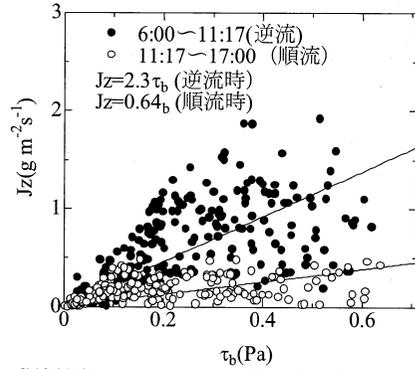


図-7 乱流鉛直SSフラックス J_z と底面せん断応力 τ_b の関係 (2007年8月31日, 筑後川14K, 底面上38cm)

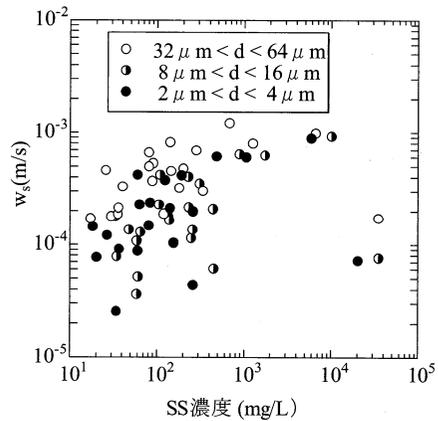


図-8 粒径別の沈降速度 w_s のSS濃度依存性 (2007年8月31日, 筑後川14K, 底面上50cm)

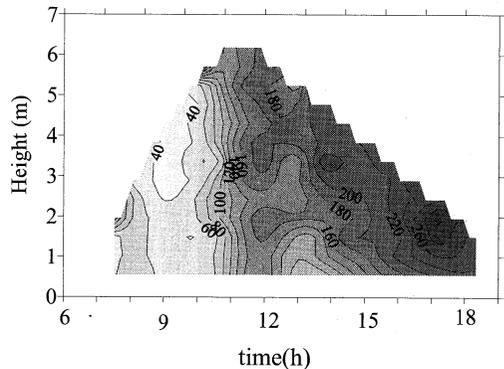


図-9 LISST-100により測定されたSSの中央粒径(μm)の鉛直分布(2007年8月31日, 筑後川14K)

化することがわかった。下げ潮時は比較的フロックの重量割合が高い状態が継続することが明らかになった。

(3) コア採泥結果から算出される沈降フラックス

毎月の測量による底質標高の変化履歴から、コアの堆積厚を算出した。底質深度50cmのところは、2007年9月3日のコア採泥結果では底質表面であった。その直近に

小出水があり(9月16日), やや粗い粒径の土砂が堆積したものと考えられる(図-11).

底質コアの有機炭素(TOC)含有量は細砂の混入により濃度が低下している. 土砂の密度計測結果の鉛直分布および含水比の鉛直分布から, 細砂の上部に堆積した土

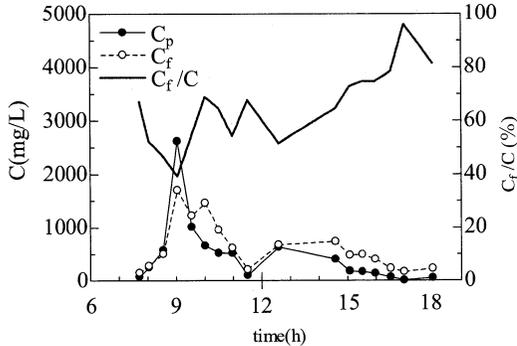


図-10 単粒子態SS濃度 C_p , フロック態SS濃度 C_f , フロックの割合 C_f/C (2007年8月31日, 筑後川14K, 底面上50cm)

砂量を計算した結果, この上に堆積したSS量は 166.4kg/m^2 と算出された. 2007年11月2日までの中潮・大潮日数30日で除すると, 一日あたり堆積速度は $5.6\text{kg/m}^2/\text{day}$ となった. これは fluid mud の厚みに換算して 0.11m/day に相当する. 一潮汐(0.5day)における沈降したSSによる fluid mud 形成が 0.05m 前後であったことから 0.10m/day 前後の堆積と推定され, ほぼ整合している.

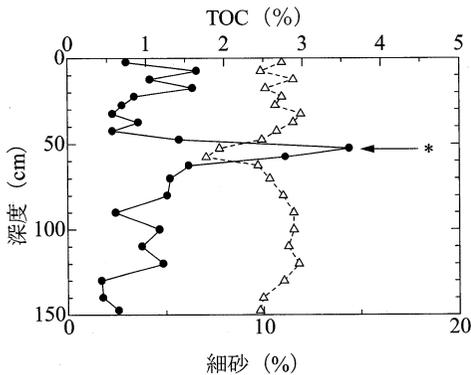


図-11 2007年11月2日に採取された底質コアのTOC(Δ), 細砂割合(\bullet)(筑後川14k地点, なお*は2007年9月16日の出水による土砂と推定される)

4. 結論

本研究は, 筑後川感潮域における懸濁物質の凝集・沈降特性を明らかにすることを目的として一潮汐の観測を行った. 現地ではSSの乱流鉛直フラックスが沈降フラックスを下回るとSSの沈降が開始した. SSの急速な沈降により河床でSSが濃縮されて, fluid mudを形成する. また, 形成されたfluid mudは潮流によって移動しているとみられた. 再懸濁フラックスは同じ底面せん断応力でも上げ潮の方が大きくなり, この非対称性も感潮河道への底泥堆積を促している. また, 底面せん断応力が高いときは単粒子の割合が増え, フロックの割合が減少していた. 筑後川感潮域での底泥の堆積速度は大潮~中潮にかけて 0.1m/day 前後になるとみられた.

謝辞: 本研究は(財)河川環境管理財団の研究助成「河川汽水域における底泥の堆積・圧密・強度発現過程と地形変化に関する調査研究」(代表: 横山勝英)を受けて実施された.

参考文献

- 金子祐, 横山勝英, 山本浩一(2008): 筑後川感潮河道の蛇行部における高濁度水塊の横断分布特性, 海岸工学論文集, 55 (印刷中)
- 中川康之, 渡邊和重, 谷川晴一, 黒田祐一(2004): 海底面近傍における底泥密度の鉛直分布特性の把握, 海岸工学論文集, 51, 986-990.
- 山本浩一, 横山勝英, 山田文彦, 安江洋介, 速水祐一(2008): 有明海・筑後川感潮域での懸濁物質の沈降特性, 海洋学会春季大会講演要旨集, 101.
- 横山勝英, 山本浩一, 一寸木朋也, 金子祐(2007): 筑後川感潮河道における底泥の堆積過程に関する調査, 海岸工学論文集, 54, 451-455.
- Kranenburg, C. (1994): On the fractal structure of cohesive sediment aggregates, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 39, 451-460.
- Mehta, A.J., (1986): Characterization of cohesive sediment properties and transport process in estuaries, in: Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Vol.14, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics with Special Reference to Physical Processes in Estuaries, ed. A.J. Mehta, 290-325.
- Yamamoto, K., Yokoyama, K., Takashima, S., and Abe, S. (2007): Behavior of the turbidity plume relating to a density current in a tidal river, Sediment and Ecohydraulics, Elsevier, 69-82.