筑後川感潮域塩水フロント付近における懸濁物質の 沈降速度増加現象に関する研究

Study on the Phenomenon of the Settling Rate Increasing of the Suspended Sediment around the Salinity Front in the Chikugo River Estuary, Japan

内山卓也¹ · 山本浩一² · 横山勝英³

Takuya UCHIYAMA, Koichi YAMAMOTO and Katsuhide YOKOYAMA

It is important that flocculation and settling of the suspended sediment (SS) on the formation mechanism of the bottom mud in the tidal river. In this study, the field observation on the settling rate was done in one tide in the tidal river of the Chikugo River, Japan at a spring tide. The new techniques for the measurement of the settling rate of SS were developed to compare settling velocity with the turbulence kinetic energy, SS concentration, chl-a/SS, and salinity. As a result of this study, it is clarified that the reason of the increase of the settling rate around the salinity front was owing to the mixing of the SS with algae, salinity intrusion and the rapid decrease of the turbulent around high tide.

1. はじめに

現在,河川感潮域での底泥の堆積による河積の低下や 航路の阻害が世界中で問題となっており,懸濁物質の凝 集・沈降に底泥の形成メカニズムが重要視されている. 懸濁物質が凝集してフロックとなることで沈降速度を増 し,底面においてフロックに含まれる粘着物質の働きで 接着し,堆積・圧密して底泥が形成されると考えられて いる.河口域で底泥を形成する第一段階としてのSSの凝 集現象は塩分や乱流によるものとして説明されることが 多い.そこで本研究では,河川感潮域におけるSSの沈降 速度を実測し,SSの沈降特性の解明と乱流がSSの沈降 速度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする.

2. 研究方法

(1) 調査対象河川の概要

本研究での調査対象河川である筑後川は九州最大の一 級河川である.図-1に筑後川の平面図を示す.筑後川は 日本一広大な干潟面積を有することで有名な有明海に流 入する最大の河川であり,年間淡水流入量の約45%を占 めるため,有明海奥部の水環境にとって重要な役割を果 たしていると考えられる.流域面積は2,860km²,幹川流 路延長は143kmであり,筑後大堰が設置されている河口 から23kmより下流が感潮域である.17.4kmには床固め が設置されており,9kmから6.5kmの区間は分流し,一 旦6.5kmで合流してから再び分流して有明海に接続して いる.沖合10km程度までは干潟となっている.河口域

1	非会員		山口大学大学院理工学研究科
2	正会員	博(工)	山口大学准教授大学院理工学研究科
3	正会員	博(工)	首都大学東京准教授都市基盤環境コース



の潮位差は5m程度であり、大潮時には平均水深が2mから7mの範囲でダイナミックに変動する.

(2) 現地調査方法

現地観測は高濁度水塊の発達が著しい河口から上流に 14kmの地点で,2009年9月7日の大潮時に集中調査を行 った.調査は固定船で濁度計式沈降筒による表層下0.6m, 河床上0.4mの観測・採水を行い,ラグランジュ船で超音 波流速計による漂流観測,採水型沈降筒による表層下 0.6mの採水を行った.14km地点の観測配置を図-2に 示す.

(3) 調査方法

a)採水型沈降筒による沈降速度計測方法

大潮時の集中観測において、ラグランジュ船による14 km地点の左岸、右岸で採水型沈降筒(山本ら、2008)を 用いた沈降速度計測を行った.水面下0.6mの位置におけ る沈降速度を求めた.



b) 濁度計式沈降筒による沈降速度分布計測方法

大潮時の集中観測において、固定船による14km地点の 右岸で沈降速度分布を求めるため濁度計式沈降筒(図-3) による計測を行った. 濁度計式沈降筒は河床から立ち上 げた単管に沿わせる形で0.5mの位置に設置したものと固 定船の横に固定する形で水面から0.5mの位置に設置した.

ペリスタポンプで吸引することにより、下部から濁 水を引き入れて上部から排出・換水して停止後、水面 のバルブを閉じ、濁度・Chl-aの連続計測を2秒間隔で 行った.

c) ラグランジュブイ付属超音波流速計による乱流計 測方法

14km地点において移動船からブイを付属させた超音波 流速計(Nortek Vector)を30分間隔で10分間漂流させる ことで,表層下1.75mの乱流を計測した.

(4) 分析方法

a)SS分析方法

SS濃度は採水された試料について50~500mlをあらか じめ計量したWhatmann GF/Fフィルター(公称孔径約 0.7µm)で濾過し,105℃で一晩乾燥してろ過前後の濾紙 の重量差から求めた.

b) Chl-a分析方法

採水された試料について50~200mlをWhatmann GF/F フィルターで吸引ろ過し,分析まで-30℃で凍結保存し



た. 抽出はDMF (N, N, ジメチルフォルムアミド)を 用いて常温で6時間程度抽出した後, Turner Trilogy蛍光 光度計を用いて測定した. Chl-a濃度の測定はStandard Methods 20th (APHA, 1998) に従って行った. なお, ろ 過は採水されてから12時間以内に行った.

(5) 解析方法

a) ラグランジュブイ付属超音波流速計による乱流測定 乱流エネルギーは、64Hzで40秒間取得した2560個の データについて解析した.生データはブイの揺動の影 響を含んでいるため、21データ(0.3125秒)の移動平 均から乱流流速を求め、式(1)で乱流エネルギーを求 めた.

ここで, TKE: 乱流エネルギー (J), ρ:水の密度 (kg/m³), u': x方向乱流流速 (m/s), v': y方向乱流流速 (m/s), w': z方向乱流流速 (m/s)

b)採水型沈降筒による沈降速度推定方法

採水型沈降筒によりSSの沈降速度を測定した.筒の 上端から中間採水口において筒内の濃度分布を式(2) により表現する.式(2)を沈降時間tで積分し、中間採 水口から流出した水のSS濃度と比較することにより沈 降速度wsを決定した.詳細は山本ら(2008)に述べて いる.

ここで, C (z, t) :筒の上端からz (m) における時刻 *t* における SS 濃度 (g/m³), w_s: 沈降速度 (m/s) である.

c) 濁度計式沈降筒による沈降速度推定方法

濁度計式沈降筒による濁度を沈降筒内で連続的に測定 することによって濁度の時間変化から沈降速度分布を求 める.濁度測定ラインでポンプ停止から時刻t後に計測 した濁度をC(t)とする.濁度計の測定ラインから上の カラムの高さをLとすると,沈降速度がL/tの粒子は,ち ょうど時刻t後に濁度測定ラインの上部カラムには存在 しなくなる.すなわち,沈降速度wsがL/tよりも小さい 粒子の割合をαとすれば,濁度と沈降速度の関係は式(3) のようになる.αを沈降速度に対してプロットすると沈 降速度分布が得られる.濁度とともにクロロフィル蛍光 も取得できるため,SSと藻類の沈降速度分布を同時に取 得することができる.今回用いた測定器についてはL= 10cmとした.

ここで,*L*:濁度測定ラインから沈降筒上部までの距離, *t*:ポンプ停止からの経過時間(秒),*C*(t):*t*秒後にお ける濁度ないしクロロフィル蛍光である.

3. 研究結果

(1) 流速・塩分・SS 濃度・乱流エネルギーの変化

図-4に塩分,河床上0.6mにおける流速,河床上0.5m, 表層下0.5mにおいて計測した塩分を示す.流速は7時前 から逆流を始めており,11時に憩流となり,続いて順流 となる.逆流流速が減少しはじめる午前9時頃から塩分 の高い水塊の通過がみられ,11時ころ最大濃度となった. SS濃度(図-5)は上げ潮最大流速になるまで表層におい ては濃度が増大した.底層においてはその後しばらく濃 度の増大が続いた.最高濃度のピークがずれていること からもわかる.

ラグランジュブイを用いて測定した乱流エネルギーの 時系列変化の結果を図-6に示す.上げ潮が下げ潮よりも 5倍程度乱流エネルギーの最大値が高いことがわかる. 上げ潮時に高い乱流エネルギーを記録して直後2時間で 急激に乱流エネルギーが減少したことも読み取れる.

(2) 採水型沈降管による表層水SSの沈降速度

採水型沈降筒による表層水のSSの沈降速度の時系列変 化を図-7に示す.SSの沈降速度は干潮時などで10⁶m/sほ どであるが、上げ潮にあたる9時~10時で10⁻⁵m/sまで上 昇、10時~11時で10⁻⁷m/sであり、下げ潮にあたる11時 ~12時で再度上昇していることが見られる.満潮時に沈 降速度が急減少しているのは沈降速度が早い粒子から先



図-4 底層流速,塩分の変化(2010年9月7日,筑後川14km)



に沈降した影響であると考えられる.同時に撮影した表 層のフロック画像から沈降速度が上昇している時間帯で はSSがフロックを形成して,フロックの粒径を増加して いることがわかる(写真-1).

(3) 濁度計式沈降筒による沈降速度分布

濁度計式沈降筒によって観測した表層, 底層のSS濃度, Chl-a濃度を用い,初期濃度をC(0),t秒後の濃度をC (t)とし,C(t)/C(0)と沈降速度w_sの関係を各時間 における沈降速度分布曲線とした.表層下0.6m,河床上 0.5mのSS, Chl-aよる沈降速度分布の一例として図-8に





写真-1 水中顕微鏡で観察した表層水中(60cm深)における フロック画像

示す. 底層の沈降速度分布は, 干潮時である7時頃では SSとChl-aは異なる別の挙動であった. しかし, 上げ潮 によってSS濃度が上昇する9時以降ではSSとChl-aは沈 降速度が大きな領域で沈降速度分布が一致することがわ かった. 特に満潮時においてはSSとChl-aが共に挙動し ており, SSとChl-aが共に沈降していることが考えられ る. あるいは, Chl-aが付着した底質が沈降していること を示している.

(4) 濁度計式沈降筒による推定沈降速度

濁度計式沈降筒で求めた沈降速度分布は式(4)で近 似することができた.

 $\frac{C(t)}{C(0)} = a + b \ln w_s \qquad (4)$

ここで, a, b:定数, w_s:沈降速度である.これを用い て沈降速度の推定を行い,推定された50%沈降速度(沈 降速度加積曲線において,50%となる沈降速度)の時系 列変化を図-9に示す.これより,底層のSSとChl-aの推 定沈降速度のそれぞれはよく似た挙動をしていることが わかる.特に上げ潮~下げ潮にあたる9時~13時の推定 沈降速度は近い値を示している.このことからも,底層 では上げ潮から下げ潮においてSSとChl-aが共に挙動し ていると考えられる.







図-9 濁度計式沈降筒による底層のSS, chl-aの沈降速度の時 系列変化(2010年9月7日, 筑後川14km)

(5) 懸濁物質中のクロロフィル含有量

表層下0.6mと河床上0.5mにおける採水サンプルのSS に対するクロロフィル含有量の時系列変化を図-10に示 す.表層におけるクロロフィル含有量は底層におけるク ロロフィル含有量よりも多いことがわかる.しかし,上 げ潮時から下げ潮時に表層の含有量が底層の含有量に近 い値まで低下しており,表層から底層まで混合されてい ると考えられる.

4. 考察

(1) 沈降速度の比較

採水型沈降筒を用いて推定した表層のSSの沈降速度と 濁度計式沈降筒を用いて推定した底層のSSの沈降速度を 比較すると,底層ではSSの沈降速度が表層よりも10~ 100倍速い沈降速度であり,これは,表層に比べ,底層 のSS濃度が高く,フロックも大きいためであると考えら れる(山本ら,2008).また,一般的にSS濃度が高いと, 沈降速度が速くなることは知られている(例えばMehta, 1986).

濁度計式沈降筒によって推定した底層のSSとChl-aの 沈降速度を比較すると、上げ潮~満潮~下げ潮について 両者の沈降速度のオーダーが同程度であり、底層におい てはSSとChl-aが共に挙動している.すなわち粘土粒子 と藻類のフロックを形成していることを示唆していると 考えられる.実際に現地水中で顕微撮影されたフロック は粘土粒子と藻類およびその破片の集合体となっていた.

これから、上げ潮による底質の巻き上げにより、表層 のSS濃度が上昇し、表層のChl-a(藻類)と凝集し、沈 降速度を速めたのではないかと考えられる.また、藻類 についていえば、粘土粒子との混合により急速に沈降し たとの見方もできる.

(2) 沈降速度と乱流エネルギー,塩分の関係

乱流エネルギーは上げ潮・下げ潮とともに上昇し,満 潮時・干潮時に減少するが,特に上げ潮時から満潮に至 るときの乱流エネルギーの減少が著しい.表層水のSSに ついては乱流エネルギーが減少傾向に転じたとき著しく



図-10 Chl-a/SSの時系列変化(2010年9月7日, 筑後川14km)

沈降速度が増加していた.

乱流エネルギーが増加傾向にあるときはフロックの形 成と破壊が平衡,もしくは破壊が上回る状態であると考 えられるが,乱流エネルギーが減少傾向へ転じるとむし ろフロックの形成速度が破壊速度を上回り,急速に凝集 が進むと考えられる.

観測日の9時をピークとして乱流エネルギーが急激に 減少した直後,写真-1右上のような直径500µm以上のフ ロックが水中に出現したことがビデオ顕微鏡観察により わかっている.

塩分については乱流エネルギーが減少するタイミング で急増した.負電荷を帯びた粘土粒子にカルシウムイオ ンやマグネシウムイオンなどの正電荷を多量に含む海水 が混合したことで,懸濁粒子の荷電中和が起こる.

これにより,粒子間の電気的反発力を減じ,粒子間力 が電気的反発力を上回ることによって粘土粒子が凝集, フロック化し,沈降速度が増加したのではないかと考え られる.

5.まとめ

筑後川感潮河道の底泥堆積が著しい地点における大潮 時におけるSSの沈降速度増加のメカニズムは、下記のよ うに考えられた.干潮時,表層水はSS濃度が低く藻類の 含有量の高い状態,底層水はSS濃度が高く藻類の含有量 が低い状態にあり,これが上げ潮時の流速増大により表 層から底層で粘土粒子と藻類の混合が進む.満潮直前に おいて塩分の侵入により一次粒子の凝集が起こり,かつ 流速の減少とともに乱流エネルギーが減少することで, フロックの形成が進み,SSと藻類の凝集体の粒径が増大 して沈降速度が増大する.すなわち,満潮直前に塩水フ ロントが到達する地点周辺において特異的に沈降速度が 増大する.

藻類との凝集体の形成に関して,干潮時に河川上流か ら移流する淡水性藻類や,上げ潮時に到来する海域から の粘土粒子が沈降速度増大に関与している可能性があ り,今後さらに検討する必要がある.

謝辞:本研究の実施にあたり平成21年度科学研究費補助 金(若手B,横山勝英),および河川環境管理財団河川整 備基金(重点課題,横山勝英),平成21年度山口大学若 手研究者支援経費(代表,山本浩一)の援助を受けた. 現地観測の実施に際し,下筑後川漁協の塚本辰己氏には 傭船の面で,いであ株式会社九州支店の皆様には機器設 置の面でご助力いただいた.ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 山本浩一・横山勝英 (2008): 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,海岸工学論文 集,55, pp. 1431-1435.
- APHA (1998): Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- 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.