

筑後川感潮河道における底泥の横断堆積構造

CROSS-SECTIONAL PROFILES OF THE RIVER-BED FINE SEDIMENT IN THE CHIKUGOGAWA RIVER ESTUARY

横山勝英¹・山本浩一²・金子 祐³・高島創太郎⁴

Katsuhide YOKOYAMA, Kouichi YAMAMOTO, Yu KANEKO and Soutaro TAKASHIMA

¹正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²正会員 博(工) 山口大学准教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³学生会員 首都大学東京大学院 都市基盤環境工学専攻(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴非会員 いであ株式会社九州支店(〒812-0055 福岡県福岡市東区東浜1-5-12)

Cross-sectional profiles of sediments in the Chikugogawa river estuary were obtained using a core sampling technique, and the temporal variation in sediment cohesion was investigated. The water content was observed to decrease in a layer that was rich in fine sand; however, the content of fine sand in the suspended sediment was found to be lower than that in the bed sediment. It is assumed that when the suspended sediment in the turbidity maximum is deposited on the river bed, the fine sand separates from the silt-clay. The tidal current washed away a part of the silt-clay and the fine sand remained on the riverbed. Consequently, there was an increase in the content of fine sand in the bed sediment. The difference between the viscosities of natural and mixing sediments was defined in terms of the cohesiveness acquired due to the electrical, chemical, and biological uniting processes of the particles. This acquired cohesiveness could be observed within a few days after the particles were deposited on the bed, and it increased linearly with time. It accounted for approximately 67% of the natural sediment cohesiveness.

Key Words: estuarine channel, sedimentation, classification, water content, cohesion, turbidity maximum

1. はじめに

内湾に流入する緩流河川の感潮河道では、河床や河岸にシルト・粘土が堆積して緩斜面を形成することがある。横断方向の地形の緩やかな変化は、塩分や水深、流れ、河床の乾湿などの多様性を生み出し、生物の貴重なハビタットを作り出すため、横断方向の地形・底質形成メカニズムを解明することは重要である。

既往の研究として、山西ら²⁾は六角川において河岸軟泥の横断分布や強度特性を調査し、波による洗掘過程をモデル化している。横山ら³⁾は筑後川の感潮河道において軟泥の堆積過程を測量によって示し、また金子ら⁴⁾は同断面において湾曲で生じる二次流の影響でSSが河岸に集積することを示している。しかし、底泥の横断分布特性に関する研究はこの他にあまり見あたらない。

また、シルト・粘土の粘着性は底泥の形成過程や浸食耐性を検討する上で重要な要素である。底泥の粘着性に関する実験は数多く、例えば関根ら⁵⁾はS.A. クレーの剪

断強度や砂を混ぜた場合の強度変化について詳細な実験を行い、浸食速度をモデル化している。一方、横山ら³⁾は感潮河道における底泥の浸食速度が関根ら⁵⁾の実験泥と異なることを示しており、様々な場所・状況におけるデータの蓄積が必要であると言える。しかしながら、現地堆積物の特性や時間変化に関する知見は少ない。

そこで、本研究では筑後川感潮河道において横断面内で高密度なコアサンプリングを行い、底泥の横断分布特性を調べるとともに、季節ごとに同様の調査を繰り返して、底泥物性の時間変化を調べた。

2. 調査方法

(1) 観測場所の概要

観測地点の平面図を図-1に示す。筑後川は有明海に流入する最大の河川であり、河口から23 kmに設置された筑後大堰までが感潮区間となっている。河床材料は8 ~ 20 kmにおいてシルト・粘土含有率が90 %を超えてお

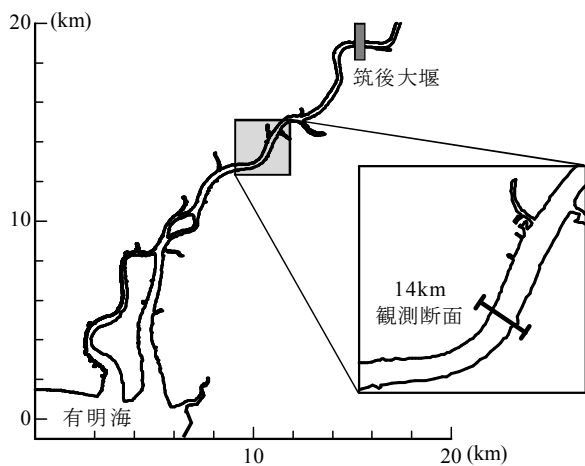


図-1 筑後川河口域の平面図と観測地点

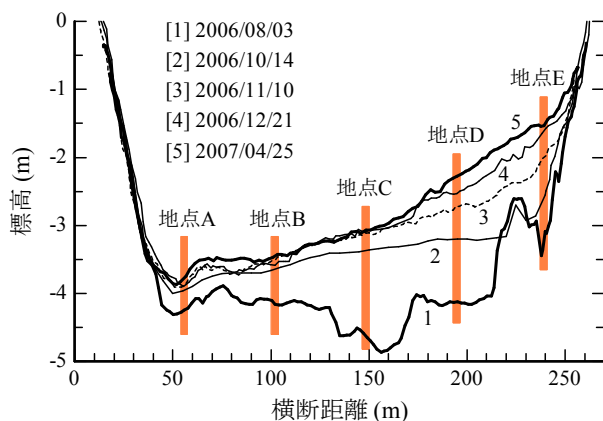


図-2 14km横断面の河床変動状況とコアサンプル地点
(横山ら³⁾の図に加筆)

り、低水路内の全域が泥質河床となっている。横山ら³⁾はシルト・粘土含有率の最も高い14 km 地点に観測断面を設定して継続的に調査を行っており、本研究でも同じ断面を対象として底泥の堆積構造を調査した。

図-2に14 km 横断面の河床変動状況³⁾とコアサンプル地点を示す。低水路幅は約250 m であり、右岸に1/50 勾配の軟泥斜面が形成されている。筑後川感潮河道では平均年最大流量程度の洪水が発生すると底泥が浸食され、14 km 断面では左右対称の河床形状になる(図中の1 番)。その後、平水流量を下回る頃から徐々にシルト・粘土の堆積が進行することが分かっている³⁾。

有明海の潮位変動は最大で6 m に達し、その影響により感潮河道の14 km 付近では朔望平均満潮位がT.P. 2.8 m、干潮位がT.P. -1.9 m (2006 年の平水時) となっている。シルト・粘土が堆積する領域は概ねT.P. -0.5 m よりも深い場所であり、右岸の水際部は大潮の干潮時に干出する。

(2) コアサンプル調査

横断方向の底泥の堆積構造を調べるために、2007年4月25日、9月3日、11月2日に図-2の5地点で底泥のコアサンプルを行った。

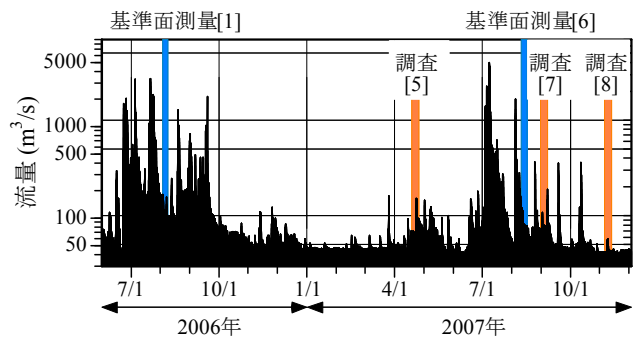


図-3 河川流量時系列とコアサンプル時期

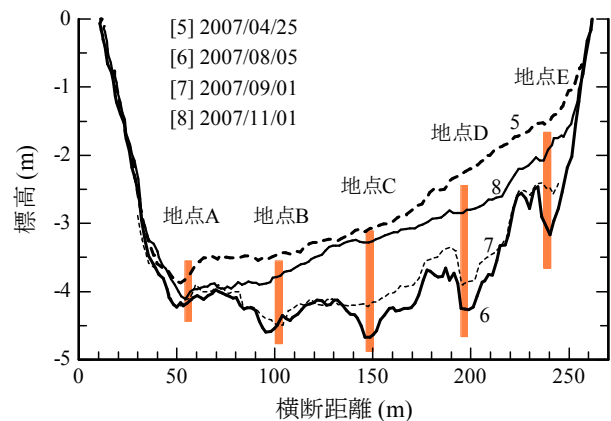


図-4 2007年の河床測量結果

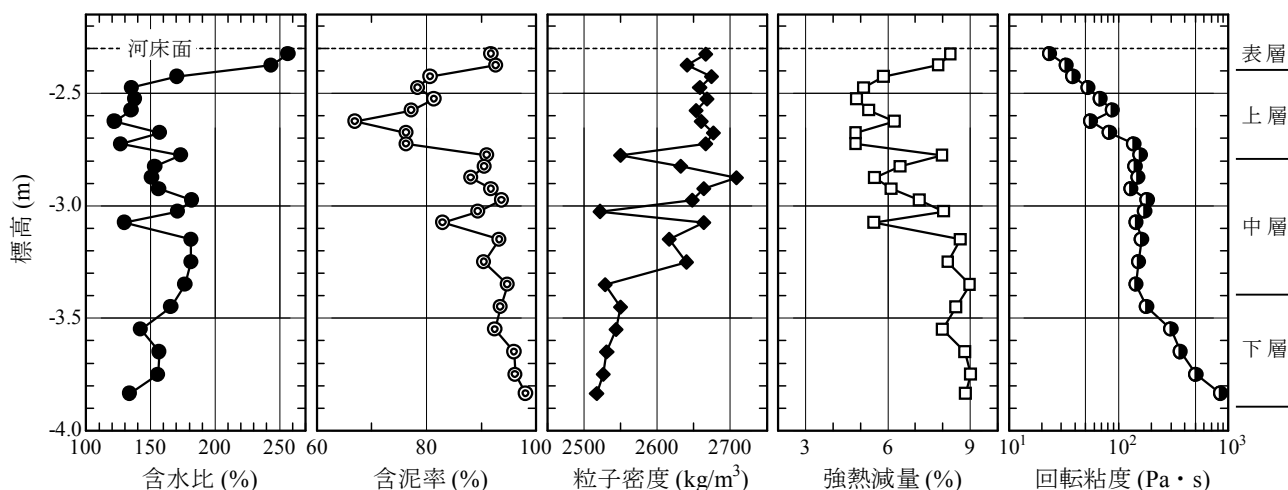
表層付近は含水比が高く流動性が高いため、垂直押し出しによって分割・分析した。ダイバーが1 m のアクリルパイプを用いて全長0.7 m 程度のコアを採取し、漁港にて表面水をチューブで抜き取った。そして、コアを垂直に立てたままパイプ底面から5 cm ずつ押し上げることで、表層付近を一切攪乱せずに正確に分析した。深層については2 m のアクリルパイプを用いてコアを取得し、漁港にて水平に倒し、半円筒ケースの上に表面から押し出した。この方法では表層の高含水比層は失われるため、横倒しする前に1 m コアとの接続位置に目印の小片を埋め込んでおき、そこから下の層を分析した。

得られた試料に対して、粘着性や強度の時間変化・空間分布を調べる目的で回転粘度試験を行った。現地ではコアを切り分ける前の不攪乱状態で粘度測定を行い、その後、試料をポリ容器に切り分けて実験室に輸送し、十分に攪拌してから粘度を計測した。使用機器は簡易型の回転粘度計(東機産業、TVC-5)であり、底泥の粘着性が最も発揮される回転初期の最大粘度を読み取った。

これらの試験が終了した後に、含水比、粒度組成、粒子密度と強熱減量を分析した。粒度組成の計測は基本的にレーザー回折式粒度分析装置(島津製作所、SALD-3100)によって行い、0.2 mm 以上の砂分が卓越する試料についてはふるい分け試験を併用した。

(3) 補助調査

デジタル魚群探知機(Eagle, Fish Strike 2000C)を用いて



図－5 コアの含水比，含泥率，粒子密度，強熱減量，粘度の鉛直分布（調査[5]，地点D）

河床の横断測量を行い，コアサンプルの採取標高を求めた。また，コアサンプル調査とは別に横断測量を定期的に行い，同時に表層材料を横断面内の12地点で採取して，地形・底質の変化状況を把握した。

底質の起源となるSSの流動状況を調べるため，濁度モニタリング，SS採水分析，流速モニタリングを実施した。濁度と流速鉛直分布は10分間隔で通年観測を行った。また2006年11月7日に濁水を採取してSS分析を行い，濁度－SSの相関式を作成した。さらに，SSの粒度分析も実施した。詳細は横山ら³⁾を参照されたい。

3. 底泥の堆積構造

(1) 河床の基準面

図－3に河川流量とコア採取時期の対応を，図－4に本研究の実施期間における河床の測量結果を示す。2006年7月と2007年7月にそれぞれ筑後川の平均年最大流量(2,700 m³/s)を上回る洪水が発生し，8月初旬に実施した測量の結果〔1〕と〔6〕から，これらの洪水によって泥質河床が浸食されて各年の最低河床面になったことが確認された。河床材料は50～60%の領域で砂に変化しており，各年の8月初旬〔1〕と〔6〕を底泥堆積の基準面と考えることができる。8月以降も500～1,000 m³/sの洪水が発生しているが，定期測量によれば河床浸食は生じていなかった。

ここで，3回実施したコアサンプリングは流量との関係から2つのグループに分けることができる。4月のコア調査〔5〕は十分に堆積が進んだ状態，9月のコア調査〔7〕と11月のコア調査〔8〕は堆積途中の状態と言える。本章では，河床が安定形状に達したときの底泥堆積構造について調査〔5〕から検討する。

(2) 安定河床における底泥の堆積構造

図－5に調査〔5〕における地点Dの底泥物性の鉛直分布を示す。Dは堆積層が最も厚い場所である。

含水比は鉛直方向の規則性が見られず，表層の0.1 mにおいて約250%という高い値を示すものの，深さ0.1 mから0.5 m（標高-2.4～-2.8 m；上層）では約130%にまで低下している。さらに，深さ1.1 mまで（標高-2.8～-3.4 m；中層）は150～180%と多少上昇し，それより深い場所（標高-3.4～-3.9 m；下層）では再度低下している。一般に堆積の層序が崩れなければ，新規堆積層では含水比が高く，古い層ほど圧密を受けて含水比が低下すると考えられるが，本研究で取得したコアサンプルはそのような連続性が見られなかった。

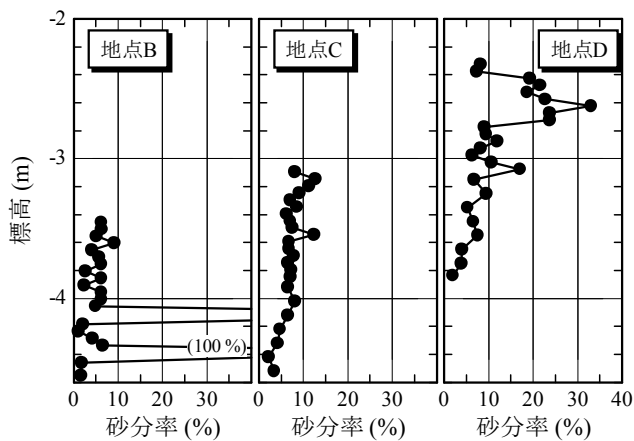
含泥率（0.075 mm以下の割合）は上層で80%を下回っているが，下層では90%以上である。また，上層では粒子密度が2,650 kg/m³程度，強熱減量が5%程度であるから，細砂を含む鉱物質が主体の泥が堆積していると考えられる。下層では粒子密度が2,520～2,550 kg/m³，強熱減量が8～9%であるから，有機物を含むシルト・粘土が堆積していると考えられる。中層は粒子密度と強熱減量の変動幅が大きい。したがって，堆積時期によって底泥の構成が変化していると見ることができる。

上層の含水比が中・下層よりも低いのは，細砂が20%以上混在することに原因があると考えられる。細砂が混じることで間隙水が脱水しやすくなり，粒径の細かい下層よりも短期間で圧密が進んだと推測される。

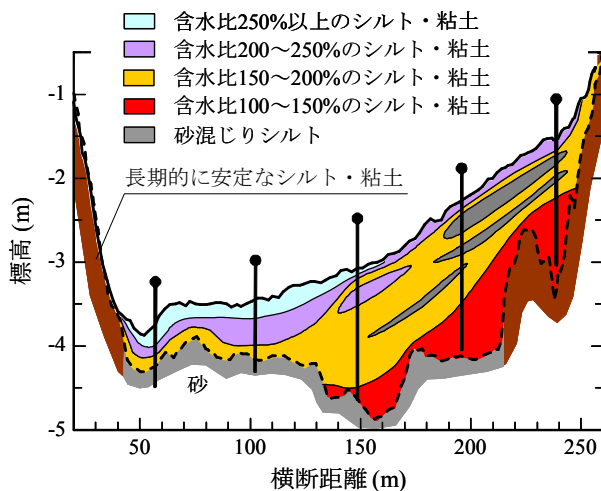
粒子の粘着性の指標となる回転粘度値は下層が上層の10倍程度大きい。上層は堆積期間が短いことと粘着性のほとんど無い細砂分が多いために粘度が低いと考えられ，粘着性の発現には時間と粒径成分が貢献している可能性がある。

(3) 底泥の横断分布

横断方向の変化の一例として，図－6に0.075 mm以上の砂の割合の比較を示す。地点Bにおいて標高-4 mより下の場所で砂が100%になっているのは，洪水時に露出した基盤層である。洪水後の堆積層で砂分率を比較すると，地点Bでは鉛直平均値が5.5%，地点Cでは7.3%，地



図－6 砂分率の横断比較（調査[5]）



図－7 底質の横断分布図（調査[5]）

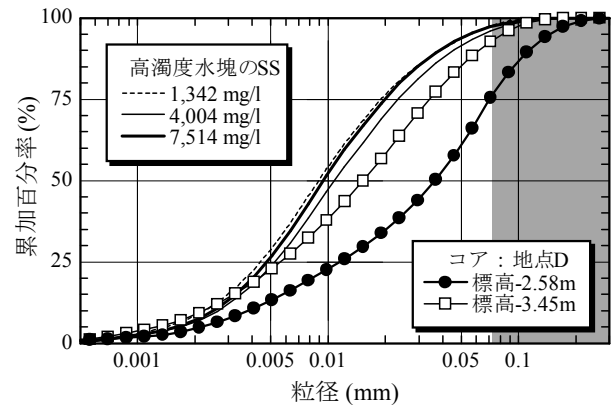
点Dでは12.3 %と右岸に向かうにつれて上昇しており、右岸ほど細砂の割合が高いことが分かる。

コアサンプルの含水比、含泥率などから推定した14 km 横断面の堆積構造図を図－7 に示す。河床下部の破線は2006年7月の洪水後の河床面[1]であり、22.7 m 間隔で採取した表層材料を記入している。

左岸最深部では含水比が200 % 以上の軟泥層が大半を占めているが、中央から右岸にかけて含水比が200 % 以下の層がほとんどとなり、また地点Dや地点Eでは砂混じりシルトが互層になっている。14 km 地点では底泥が右岸に多く堆積して緩傾斜をなしているが、右岸の方が堆積量が多いために圧密が進行しやすいというだけではなく、SS が堆積する際に横断方向に土粒子の分級が生じている可能性が考えられる。

(4) 堆積構造とSS 輸送状況の関係

右岸に見られる細砂の起源を考察するため、まず河川流況を図－3 で確認する。堆積期間は2006年8月3日から2007年4月25日までであり、このうち8月と9月は河川流量が多いが、10月以降は平水流量になっている。筑後川感潮河道における既往の調査によれば、洪水時の濁



図－8 高濁度水塊のSS 粒度分布（2006年11月7日）

水⁶⁾よりも潮汐流で生ずる高濁度水塊³⁾の方がSS 濃度が高く、例えば2006年7月5日の洪水ではピークSS 濃度が460 mg/l であるが、高濁度水塊のピークSS 濃度は3,000 ～6,000 mg/l である。高濁度水塊の方が洪水濁水のSS よりも1 オーダー濃度が高いため、調査 [5] の堆積期間において細砂成分が流域から供給されたとは考えにくい。

次に、堆積期間中に高濁度水塊から採水してSS 濃度と粒度の分析を行った（図－8）。濁水中の細砂成分はいずれのSS 濃度でも3 % 程度である。堆積物を見ると、下部のシルト・粘土層では濁水に近い粒径構成となっているが、上層では細砂が顕著に多く、最大粒径は0.3 mm 程度であって濁水とは明らかに異なる。採水は1 日しか行っていないため、堆積期間を通じて同じ粒度分布であるとは限らないが、上層では高濁度水塊によって輸送されたSS がそのまま沈積したかどうか疑問である。

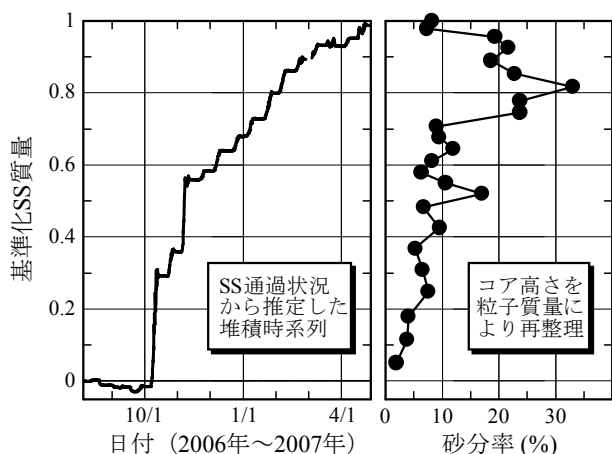
そこで、SS の断面通過量と底質堆積の関係を調べる。横山³⁾は14 km 地点で通年計測している流速鉛直分布から断面流量を求め、これに濁度連続データから換算したSS を乗じてSS 通過量を求めている。本研究では計算の期間を2007年4月25日まで引き延ばして累積SS 通過量を求め、正味の逆流量が堆積に寄与すると考えて最終値で基準化し、季節ごとの堆積量配分を計算した。

また、14 km 堆積物については地点D を代表点として、コア各層の単位面積あたり粒子質量 W_s (kg/m²) を次式で計算し、全量で基準化して鉛直方向の質量配分を求めた。

$$W_s = \Delta h \cdot \rho_s \left/ \left(1 + \frac{\gamma}{100} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \right. \quad (1)$$

ここで Δh : コアの分割層厚、 γ : 含水比(%), ρ_s : 土粒子密度(kg/m³), ρ_w : 間隙水密度(kg/m³) である。間隙水密度は1,000 kg/m³ とし、それ以外は各層の分析値を用いた。

計算結果を図－9 に示す。SS 通過状況から、2006年10月初旬以前は若干の浸食傾向であるが、それ以降は堆積に転じている。11月中旬までの約1ヶ月間で全体の57 % が堆積しており、その後は約5ヶ月をかけて43% が堆積したと推測される。質量比で再整理したコア鉛直分布と



図－9 SS累積通過時系列とコア砂分率の鉛直分布の比較

比較すると、下層の砂分率が低いシルト・粘土層は2006年10月～11月の堆積物であると考えられ、上層の細砂混じりシルトは2007年1月以降の堆積物であると考えられる。このことから、短期間に一気に堆積した下層では濁水中のSSがそのまま封じ込められてシルト・粘土層を形成したと考えられる。

一方、上層では往復流の影響を受けながら徐々に堆積している。金子ら⁴⁾は、14 km断面において高濁度水塊が遡上する際に左岸から右岸に向かって湾曲に起因する二次流が発生することを示している。また、中央から右岸(地点C, D, E)にかけて逆流時に高濃度のSS沈殿層が形成され、順流時には沈殿層が削られてゆくことを示している。したがって、高濁度水塊の遡上時には二次流の影響で右岸にSS粒子が集積して沈降し、順流時にはそれらが再懸濁することで相対的に細かい粒子が洗い出され、結果として粗い粒子が残留・堆積すると説明される。

4. 底泥物性の時間変化

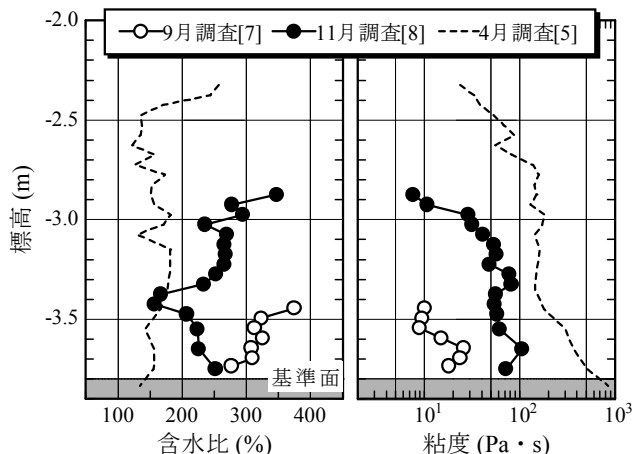
本章では浸食河床からの復元過程における調査[7]と[8]の結果から、底泥物性の時間変化について考察する。

(1) 堆積過程のコア比較

2007年は図－3, 4に示したように7月7日に最大流量が発生して堆積底泥がフラッシュされたが、8月5日までは洗掘河床に変化がないことが測量[6]で確認された。その後、9月(調査[7])になると地点CからEにかけて0.4～0.5 mの堆積が見られ、11月(調査[8])には全域で堆積が進行し、地点Dでは新規堆積層が1.0 mになった。

調査[7]と[8]で得られたコア物性の鉛直分布を図－10に示す。代表地点としてDを、物性として含水比と粘度を示している。また、調査[5]は堆積物が前年度のものであるため、参考情報として表示した。

堆積が始まってから1ヵ月以内と考えられる9月のコアは含水比が概ね300 %であり、空中に試料を引き上げた際に自立しない程度の柔らかさであった。不攪乱の回



図－10 底泥コアの物性鉛直分布の季節比較(地点D)

転粘度値は9～26 Pa・sであった。堆積厚さは0.5 mであるが、この時点で表層と底層では物性が異なっており、底層の方が含水比が低く粘度が高いことから、圧密や粘着性が生じていると考えられる。

2ヵ月後の11月には表面から0.5 mの範囲で9月コアと似た分布になっており、下層では9月コアよりも含水比が低下し、粘度は約5倍大きくなっている。表面下0.6 m(標高-3.4 m)付近で含水比が低下しているのは細砂が10～15 %混じっているためであり、10月10日に発生したピーク流量408 m³/sの小規模洪水の影響が考えられる。

11月以降も堆積は継続すると考えられる。浸食前のコア調査[5]を安定状態と考えて将来予測の参考にすると、底泥面には11月以降もSSが降り積もることで内部の圧密が進み、含水比はさらに低下すると推測される。同様に粘着性も増大すると推測される。

(2) 底泥粘着性の増加状況

現地泥の粘着性の時間変化を調べるために、コア各層の堆積時期を3(4)の方法を用いて推定する。

洪水後に底泥の堆積が生じていないことが確認されている2007年8月3日をスタートとして、流速・濁度データから累積SS通過量を計算し、調査[8]時点の全量で基準化した(図－11)。9月1日頃、9月13日頃、9月28日頃、10月26日頃に3～5日をかけてSSが堆積していることが分かる。次に、調査[8]のコア各層を式(1)で単位面積あたり質量に換算し、全長で基準化した。以上の2つの結果から、基準化SS質量が等しい層を比較して堆積時期を推定した。例えば、調査[8]の表層は約4日前に、底層は約60日前に堆積したと推測される。

粘度については、自然堆積状態の不攪乱粘度と機械的に攪乱した状態の粘度に差があることが分かっている³⁾。攪乱粘度は粒子の形状や間隙量に依存すると考えられ、これらに何らかの粒子間結合(電気的・生物的效果)による粘度を加味したものが不攪乱粘度になると考えられるため、本研究では両者の差を「獲得粘度」と定義した。

調査[8]のコアについて、層ごとに推定堆積時期と獲

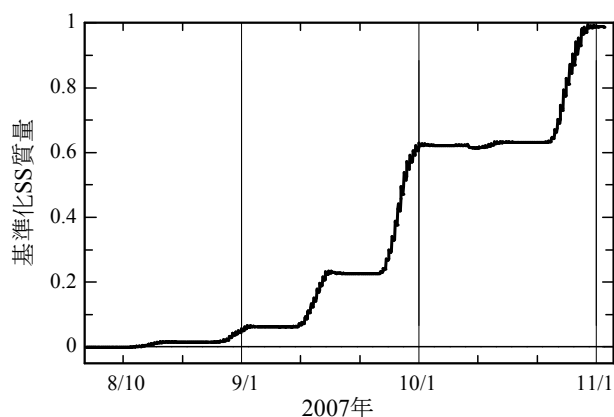


図-11 調査[8]までのSS累積通過時系列

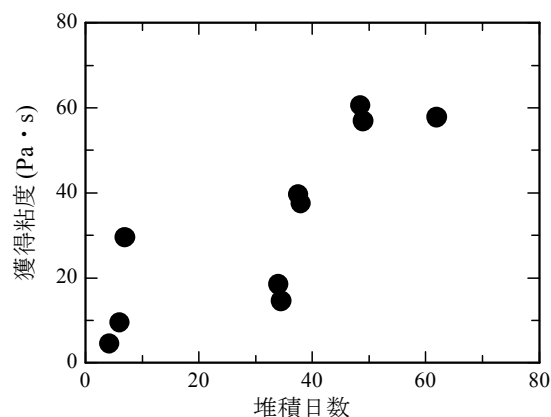


図-12 底泥の推定堆積日数と獲得粘度の相関

得粘度の関係を調べた(図-12)。SSの堆積が始まってから数日後には獲得粘度が現れており、日数に比例して獲得粘度は増大していた。また、不攪乱粘度に占める獲得粘度の割合を計算したところ平均値は67%になった。この結果は、感潮河道の底泥の耐浸食性は粒子間の結合・粘着力に負うところが大きく、粒子間結合は堆積直後から生じて時間と共に強化されることを示している。

堆積土の研究が盛んな内湾との違いを考えると、例えば東京湾多摩川沖の堆積速度⁷⁾は4 mm/yr、有明海の粘土層は10～30 mで堆積期間は6,000～10,000年であるから⁸⁾、堆積速度は1～5 mm/yrとなる。これに対して筑後川感潮河道の堆積速度は最大で4,000 mm/yrになり、内湾の1000倍である。河道は内湾よりも面積が狭いために単位面積への土砂供給量が多いとはいえ、内湾に比べて潮汐往復流が速い感潮河道においてシルト・粘土が活発に堆積することは興味深い。すなわち感潮河道では、内湾で降り積もるように粒子が堆積するのではなく、潮汐往復流に耐えながら河床にへばりつくように堆積してゆくと推測され、図-12に示した短期的な粘着力発現のメカニズムを解明することが重要であると言える。

5. まとめ

本研究では筑後川感潮河道を対象として、底泥の横断堆積構造と粘着性の時間変化についてコアサンプリングに基づいた研究を行った。

横断面内の堆積構造を調べたところ、湾曲の内岸側では外岸側よりも含水比が低く、さらに上層で含水比が低い層が見られた。含水比の低下は細砂率の高い場所で生じていたが、底泥の起源である高濁度水塊の細砂率は底泥よりも有意に低かった。これは、表面に沈殿したSS成分から潮汐流の影響によって細粒成分が洗い出され、相対的に粗い粒子が残留したためと推察された。

SS通過量の時系列から底泥の堆積時期を深度別に推定し、コア各層の堆積期間と粘着性の相関を調べた。不攪乱泥と攪乱泥の回転粘度の差を間隙量以外の要因に起因する粘着性(獲得粘度)と定義したところ、獲得粘度

は堆積開始から数日以内に現れ、時間に比例して増加しており、また自然堆積状態の粘度の約7割を占めていた。

以上より、感潮河道においてシルト・粘土が河床や河岸に堆積するためには、SS粒子の河床面での挙動や、堆積直後の粘着性発現と時間変化の過程が重要であることが明らかになったが、今後さらなる検討が必要である。

謝辞：本研究の実施にあたり平成19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の援助を受けた。底泥分析は山下大臣君(当時、首都大学東京学生)に行っていた。現地観測では下筑後川漁協の塚本辰己氏にご助力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 楠田哲也・山本晃一監修：河川汽水域【その環境特性と生態系の保全・再生】、技報堂出版、pp.159-233、2008。
- 2) 山西博幸、東修、楠田哲也、渡辺亮一：波による傾斜底泥面の洗掘に関する研究、土木学会論文集、No.607/II-45、pp.55-67、1998。
- 3) 横山勝英、山本浩一、一寸木朋也、金子祐：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、第54巻、pp.451-455、2007。
- 4) 金子祐、横山勝英、山本浩一：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、第55巻(印刷中)、2008。
- 5) 関根正人、藤尾健太、片桐康博、西森研一郎：粘着性土の侵食速度に及ぼす粘着力の影響、水工学論文集、第46巻、pp.641-646、2002。
- 6) 横山勝英、山本浩一、金子祐：筑後川感潮河道における洪水時の底質浸食過程と有明海への土砂輸送現象、土木学会論文集B、Vol.64、No.1、pp.71-82、2008。
- 7) 貝塚爽平：東京湾の地形・地質と水、築地書館株式会社、pp.188-189、1993。
- 8) 下山正一、松本直久、湯村弘志、竹村恵二、岩尾雄四郎、三浦哲彦、陶野郁雄：有明海北岸低地の第四系、九大理研報(地球惑星)、18巻2号、pp.103-129、1994。

(2008.9.30受付)