

筑後川感潮河道における底泥の堆積過程に関する調査

Sedimentation and Consolidation of Cohesive Particles in the Chikugogawa River Estuary

横山勝英¹・山本浩一²・一寸木朋也³・金子 祐³

Katuhide YOKOYAMA, Kouichi YAMAMOTO, Tomoya CHOKKI and Yu KANEKO

Behavior of fine sediment transport and sedimentation process in the estuarine channel of the Chikugogawa River were observed during the period June 2006 – March 2007. The elevation of channel bed increased about 1m in few days during the period very high suspended sediment concentrations were measured frequently, exceeding 40kg/m³. The suspended cohesive sediment accumulated at the region where the current becomes slow and settled on the bed. The viscosity of surface fluid mud was greater than that of disturbed sample. This result suggests that the settled particles consolidates at early stage of deposition, and relatively large particles don't resuspend by tidal current, then they becomes sedimentation layer.

1. 序 論

緩流河川の河口汽水域では 1 年の間に洪水流と塩水密度流が発生するため、土砂の動きが単純ではなく、河床に沈降速度が大きく異なる粘土、シルト、砂が混在している。多様な底質環境は生態系にとって重要であるが、治水の観点からは土砂堆積を抑制する必要がある、治水と生態環境の管理を両立させるためには、細粒土砂の堆積メカニズムを解明する必要がある。

感潮河道では平常時に高濁度水塊が発生し、SS が内陸側に逆流輸送されることが多くの観測により示されている (例えば川西ら, 2005)。しかし SS が堆積して底泥を形成し、河床地形が変化する様子を観測によって実証的に示した研究は少ない。

横山ら (2006) は筑後川の感潮河道において定期的な測量を行い、洪水時に底泥が最大で 1.5 m フラッシュされ、洪水後の 1 ヶ月以内に河床面が復元すると報告している。このように筑後川感潮河道は河床の季節変動が顕著であるため、本研究では同河川において河床の上昇過程と高濁度水塊の移動状況、沈殿 SS の流動性と堆積との関係などを詳細な現地観測によって調べることにした。

2. 観測方法

筑後川の観測領域を図-1 に示す。感潮域は筑後大堰までの約 23 km であり、8 ~ 16 km の区間で河床材料がシルト・粘土となっている。特に 14 km 付近において底泥の侵食と堆積が著しいことが示されているため (横山ら 2006, 2007)、本研究においても 14 km 地点に観測測線を設定した (図-2)。河口の朔望平均満潮位 (2002 年) は T.P. 2.55 m であり、干潮位は -2.26 m である。

実施項目は、横断測量、表層底質の分析、底質コアの

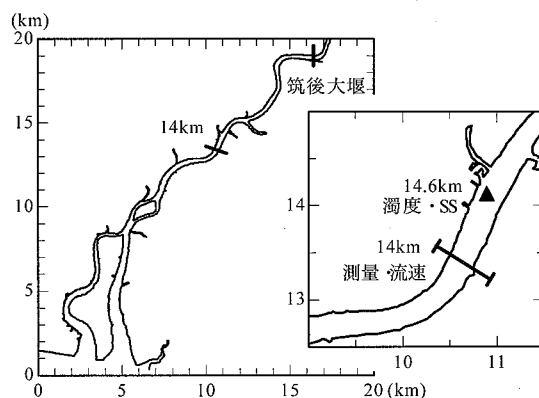


図-1 筑後川の平面図と観測領域

分析、SS・流速モニタリングであり、別途、河川流量 (国土交通省筑後川河川事務所) と感潮域水位・塩分 (水資源機構) の各データを入力した。観測期間は 2006 年 6 月から 2007 年 3 月までである。以下に各観測の方法を記す。日付は 2006 年 1 月 1 日を初日 (1) とした通算日である。

(1) 横断測量

河床地形の測量は 2 週間から 1 ヶ月の間隔で 11 回実施した。使用機材はデジタル魚群探知機 (Eagle 社 Fish Strike 2000C) である。超音波の発振周波数は 200 kHz であり、水中エコー画像を内蔵 SD カードに記録し、河床形状や浮泥の堆積状況を解析した。センサーの水平座標は魚群探知機に付属している D-GPS により、鉛直座標 (水面標高) は独自に設置した小型水位ロガー (HOBO 製 U-20) によりそれぞれ計測した。

(2) 底質の採取と分析

測量と同時に表層底質を横断方向に 12 点で採取した。改良型スミス・マッキンタイヤ採泥器を用いて低水路幅 250 m に対して 22.5 m 間隔で底泥を採取し、表層水を取り除いてからポリ容器に保存した。

表層底質は潮汐流によって流動しつつ新規浮泥が降り積

1 正 会 員 博(工) 首都大学東京 都市基盤環境コース
2 正 会 員 博(工) 佐賀大学 有明海総合研究プロジェクト
3 学生会員 首都大学東京 都市基盤環境工学専攻

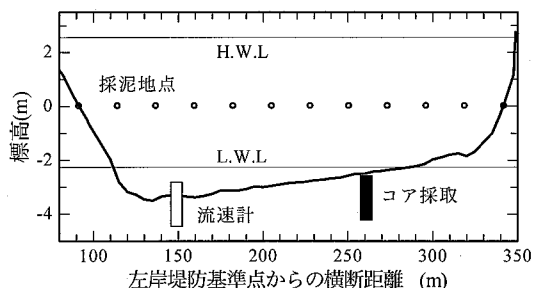


図-2 14km 地点観測測線

もることで圧密してゆくと考えられる。そこで底泥の流動性を評価するために、簡易型の回転粘度計（東機産業 TVC-5）により粘度を測定した。測定は不攪乱状態と攪乱状態の二種類について行い、底質採取後、速やかに漁港において不攪乱状態の粘度を3～5回測定し、その後に実験室において十分攪乱した底泥の粘度を測定した。さらに、粒度分布、含水比、粒子密度、強熱減量を分析した。

また、底質の堆積構造を調べるために、427日（2007.3.3）に柱状コアを採取した。採取地点は堆積が最も厚い中央部（左岸から260m）であり、潜水夫が全長2m、直径10.5cmのアクリルパイプを静かに押し込み、水中でゴム栓をして引き抜いた。採取したコアは速やかに漁港にてアクリルパイプから取り出し、10cmごとに切り分けて、前述の方法で分析した。

（3）SS・流速モニタリング

高濁度水塊の移動状況を調べる目的で、超音波流速計と濁度計を設置した。超音波流速計（Nortek 社 Aquadopp, 周波数1MHz）は河床変動が少ない左岸流心部の河床に埋設し、底面ブランク0.4m、計測セル0.5m、精度35mm/sの設定で流速鉛直分布を10分間隔でモニタリングした。

濁度計は14.6kmの道路橋脚に取り付けた。観測期間を通じて通常濃度用のアレック電子 Compact CLW（カオリン5,000mg/lレンジ）を設置し、別途、堆積が著しいと予想される洪水後3ヶ月間は超高濃度用のアレック電子 Compact HTW（カオリン70,000mg/l）を設置した。設置標高はT.P.-4.2mであり、河床近傍の浮遊土砂移動状況を10分間隔で計測した。

濁度をSSに変換するために、濁水を採取してSSの分析を行った。ただし、5,000mg/lを越える濁水は現地作業日には採取できなかったため、含水比が300%程度の表層浮泥を採取して、実験室において湿潤状態のまま水に溶かすことで超高濁度水を調製し、濁度計測とSS分析を行った。筑後川のSSに対して通常濃度濁度計の計測上限は約3,500mg/lであり、超高濃度濁度計の計測上限は約70,000mg/lであった。以上の分析結果

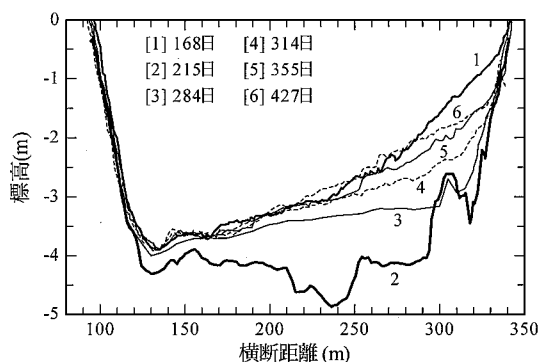


図-3 洪水前後の主な横断測量図

から濁度-SS検定線を作成し、濁度時系列データをSSに換算した。

3. 地形変化の特徴

図-3に洪水前後の主な横断測量図を示す。横山ら（2007）は河床浸食状況として、170日から210日までに1,780～3,350m³/sの洪水が連続的に5回生じて河床が2m洗掘され、シルト・粘土堆積層がほとんど全てフラッシュされて砂質基盤層が現れたと報告している。

そこで堆積状況について詳しくみることにする。215日に河床高は最低となっており、中央部に顕著な深掘れが存在する。その後、284日には河床の凹凸が無くなって緩やかに右肩上がりの堆積面が形成された。このときの左岸最深部と右岸堆積面（290m）との標高差は0.8mである。引き続き中央部から右岸にかけて堆積が進行して堆積領域が右岸にシフトしてゆき、427日には最深部と290m地点の標高差が2mにまで拡大する。

全ての測量について洪水前の断面（168日）を基準として断面積変化量を計算すると図-4が得られた。比較のために底質の中央粒径も示している。これらより、215日から266日までは変動が小さく、河床材料は1mm程度の砂であることがわかる。しかし、284日には中央粒径が0.012mmのシルト・粘土が急激に堆積し、その後は堆積速度が徐々に遅くなりながら河床面上昇が進み、427日にほぼ洪水前の状態に復している。

以上より、14km断面での堆積現象は(a)266日から284日までの急激な河床上昇と平滑化、(b)堆積領域の右岸へのシフト、の2つから構成されている。

4. 高濁度水塊の運動と底泥堆積過程の関係

（1）高濁度水塊の季節的な発生状況

既往の研究によれば、2005年には同断面において洪水終了後に約1ヶ月で河床が復元すると報告されているが（横山ら、2006）、2006年は洪水終了後、2ヶ月間は

堆積が見られなかった。そこで、堆積が進む要因を調べるために、図-5 に河川流量、14.6 km の水位、Cl (塩素イオン濃度)、SS (通常濃度濁度計) を示す。Cl は T.P.-2.5 m の値である。

筑後川では平均年最大流量が約 $2,700 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、感潮域のタイダルプリズムから推定される潮汐流量は約 $1,300 \text{ m}^3/\text{s}$ 、平水流量は $63 \text{ m}^3/\text{s}$ である。前述の通り洪水期は 170 日～210 日であったが、それ以降 270 日頃まで流量が多い状態が続き、280 日から平水流量を下回った。

Cl は洪水期が終了した 220 日頃から 14.6 km まで差し込みはじめ、平水流量に近づいた 274 日から急上昇している。Cl の上昇パターンは 2 つあり、大潮で上昇する場合と小潮で上昇する場合 (274 日頃と 290 日頃) が見られた。大潮で上昇するのは筑後川では一般的な強混合型の塩水遡上現象である。小潮での Cl 上昇は、河川流量が平水状態であり、かつ干潮位が一年の中で最も高い時期に見られたため、弱混合型の塩水楔が発生していたと考えられる。

SS の上昇は基本的に大潮時に顕著であり、非洪水期には常に $2,500 \text{ mg/l}$ を越える。ここで示した通常濃度濁度計の計測限界は約 $3,500 \text{ mg/l}$ であるため、278 日から 317 日までは限界値以上の SS が発生していた可能性がある。一方、小潮では SS が 50 mg/l 程度まで低下し、潮汐の状態による変動が非常に大きい。先に塩水の遡上パターンが 2 つあることを示したが、SS の上昇は小潮では生じていないため、潮汐流が発達して塩水が強混合状態で遡上する際に、高濁度水塊の発生が顕著になると言える。

河床の断面積変化 (図-4) と流水の状態 (図-5) を比較すると、280 日付近の急激な堆積は高濁度水塊の発生と対応している。そこで次に、堆積現象が生じている期間に焦点を当てることとする。

(2) SS の沈殿と浮泥層の形成

高濁度水塊の発生がピークとなった 283 日について、14.6 km における一潮汐の水位、Cl、SS (高濃度計)、及び 14 km の流速を図-6 に示す。最盛期には $40,000 \text{ mg/l}$ を越える Fluid Mud が感潮河道を移動していることが分かった。また、SS は上げ潮で上昇、満潮時に低下、下げ潮で再上昇するが、濃度は上げ潮の方が高い傾向が見られた。流速の最大値は上げ潮で 1.0 m/s 、下げ潮で 0.7 m/s となっており、上げ潮の方が継続時間は短いものの流速は大きかった。

図-6 の後半部分 (283.5 日付近) では満潮時に SS が最大となっているが、これは濁度計が SS の沈殿層 (浮泥層) に覆われたことによると考えられる。濁水の粒度分析を行ったところ D50 が 0.008 mm 、D90 が 0.03 mm であったが、このサイズの単体粒子は流速が弱まっ

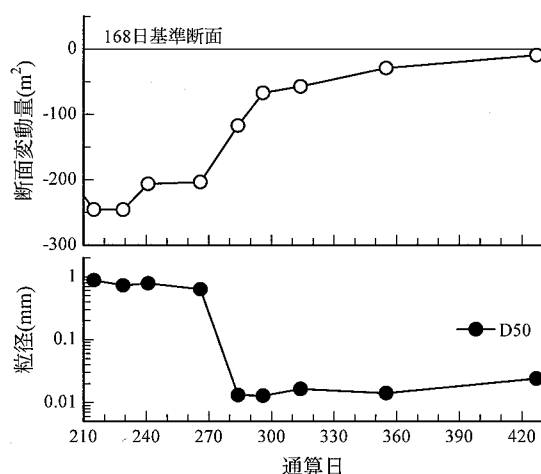


図-4 断面積変化量と底質の中央粒径

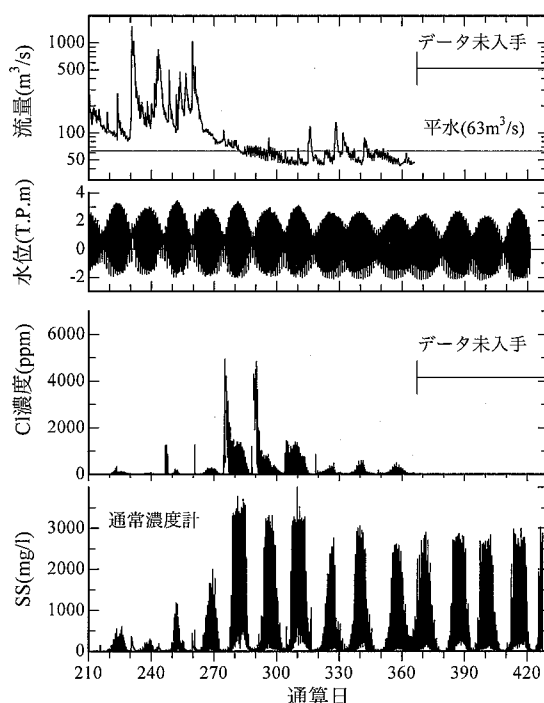


図-5 河川流量・14.6km 地点の水位・Cl・SS

た 1 時間では 0.2 m 程度しか沈降しない。しかし、河川感潮域では SS 粒子がフロックを形成することが知られており、例えば熊本県白川では塩水楔の先端付近で SS が 74 mg/l の時に最大粒径が 0.2 mm 、沈降速度が 1 mm/s のフロックが観測されている (阿部ら, 2004)。フロック粒径と最も相関があるのは SS 濃度であり、ついでプランクトンなどによる生物学的な粘着作用が関係しているとの研究例もあり (W. T. B. van der Lee, 2001)、SS が数万 mg/l となる筑後川ではフロックの沈降速度

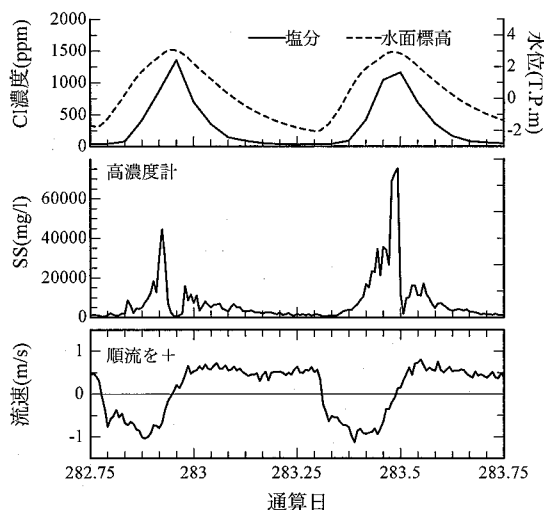


図-6 SS発生ピーク時のCl・SS・流速

が1 mm/sを上回る可能性がある。満潮時の最大水深は約7 mであるから、沈降速度が1～2 mm/sであれば憩流の1時間でSSが沈殿して河床に浮泥層を形成することが可能である。

翌284日の満潮時の魚群探知機画像を図-7に示す。超音波の周波数は200 kHzであるが、通常この周波数帯では塩水楔の境界面や底泥の表面などしか映らず、河床内部に音波が透過することはまれである。しかし画像には3つの界面が映っているため河床には密度が河川水に近い泥が堆積していると考えられ、最上部は含水比が非常に高い浮泥層、次が軟泥堆積層、最下部は砂質基盤層と判別される。31日後の315日には浮泥層の位置に河床面が存在したため、新規浮泥が追加されることで浮泥の圧密が進んで軟泥層が形成されたと考えられる。ただし、左岸から125～145 mの最深部では軟泥層の位置が上昇することはなかった。

(3) 堆積の進行と堆積領域の偏り

SSの沈殿による浮泥層の形成状況が確認されたので、次にSSの輸送状況を推定する。SS輸送量は14 kmの流速鉛直分布に14.6 kmのSS濃度を乗じて求めた。このとき、流速の鉛直分布は横断方向に均一で、またSS濃度は横断面内で均一と仮定した。そのため、通過量は過大に計算される可能性があるが、相対的な傾向を考察することとした。図-8にSS累積通過量を示す。これより14 km断面の正味通過量は平水流量となる280日頃から常に上流側を向いており、内陸にSSの逆流と堆積が進むことが分かった。特に、279日から285日、308日から310日の数日間で急激に堆積が進展していることが読み取れる。

次に、3.に示したシナリオ(b)；堆積層が右岸に偏る原因について考察する。図-7では浮泥層が160 m地点では

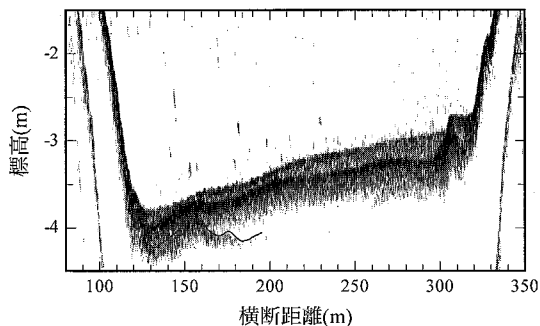


図-7 284日の満潮時の魚群探知機画像

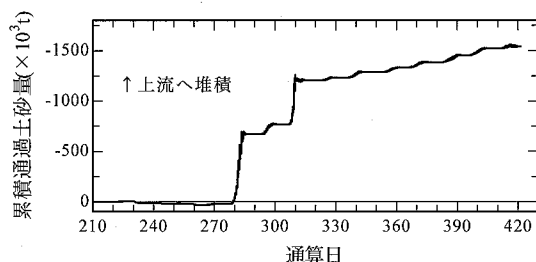


図-8 SS累積通過量

8 cmであるが、290 m地点では32 cmとなっており、一時的なSS沈殿状態において既に右岸への堆積が卓越している。また、最深部である125～145 mでは浮泥層が存在するが、最深部の河床は284日以降上昇しないため、沈殿量と再懸濁量は釣り合っていると考えられる。

これは河道の蛇行と関係していると考えられる。河道の平面図(図-1)を見ると、14 km断面は上流から流下する際には直線水路の延長と見なせるが、下流から遡上する場合にはカーブの出口にあたる事が分かる。そのため、順流となる下げ潮では流速とSSは横断方向の均一性が比較的高くなるが、逆流となる上げ潮では湾曲の内岸側(右岸)において流れが淀みやすく、SSの集積・沈殿を促進すると考えられる。SSが堆積して河床が上昇すれば、水深が浅くなることで底面剪断応力が低下するため、右岸において再懸濁作用は弱まり、SSの堆積をより一層促進することとなる。

5. 底泥の堆積構造

SSの堆積によって形成された底泥層の内部構造について検討を進める。図-9に427日に260 m地点で取得したコアサンプルの粒径、粘度(不攪乱・攪乱)の鉛直分布を示す。1.5 mには洪水後の浸食面と考えられる砂層が見られたため、上部堆積物を示している。

攪拌前の粘度(Pa・s)は表層0.14の浮泥が約17, 0.74 mまでの層が46～85, 1.24 mまでの層が134～183, 1.5 mまでの層が338～553となっており、浮泥

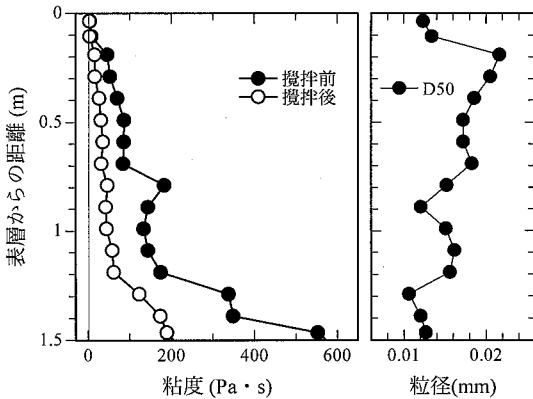


図-9 コアサンプルの粒径、粘度(不攪乱・攪乱)の鉛直分布

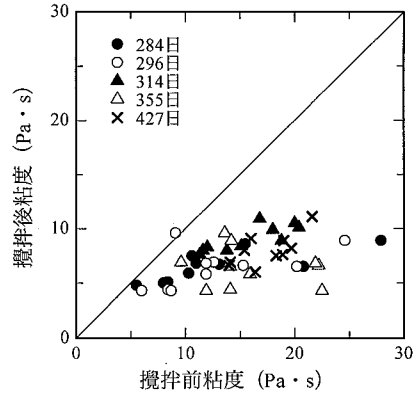


図-10 表層泥の粘度比較

を除いた固結層は大きく3層に分けられる。そのため、SSは3期に分かれて堆積したと推測することができるが、このことは図-8に見られる280日付近、310日付近とそれ以降のSS堆積期間と対応している。

攪拌後の粘度は大幅に低下しており、堆積時期が古いものほどセメンテーションによる内部結合力の獲得量が大きいと言える。ここで、表層浮泥にも攪拌前後の粘度変化が見られた。図-10に284日から427日までの表層泥の粘度比較を示す。これより、284日以降のいずれの観測日にも表層浮泥(含水比200～350%)の粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)は攪拌前が5～30、攪拌後が4～12の範囲にあり、常に攪拌前の方が流動性は低かった。粘度が5($\text{Pa} \cdot \text{s}$)程度の浮泥は内部結合力の増加が微少であるが、粘度の高いものほど結合力の増加度合いが高く、堆積初期の浮泥も内部結合力を増大させて構造的な構築していることが分かる。

感潮河道では潮汐の非対称性により微細粒子が上流側に徐々に移動・堆積してゆくとされるが、それ以外にもSSが沈殿してから短時間の間に内部結合力を獲得することで、再懸濁しにくくなり、底面にとどまって堆積に移行することが可能になると言える。

粒径は表層浮泥が0.012 mmであり、固結層は粘度と同様に3層に分かれている。固結層の上部は粒径が0.017～0.022 mmと浮泥よりも若干大きい。これは初期のSS沈殿層のなかでも粒子の細かいものは往復流によって再懸濁し、相対的に粒子の粗いものが残留して堆積してゆくことを示している。中層、下層は粒径が浮泥と同程度であって細かいが、図-8で見たように堆積が一気に進んだため、細かい粒子も堆積層の内部に封じ込められたと推測される。

6. まとめ

本研究では高濁度水塊によるSSの輸送状況と堆積の

進展過程の関係を調べるために、筑後川感潮河道において高密度な測量、底泥分析、SS、流速モニタリングを行った。その結果、超高濃度のSSが発生した際に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分かった。さらに、新規浮泥は不攪乱粘度が攪乱粘度よりも高く流動性が低かったことから、SSは沈殿初期においても内部結合力を獲得し、相対的にサイズの大きい粒子が再懸濁作用を受けずに堆積に転じてゆくことが示された。

謝辞：本研究の実施にあたり平成18年度科学研究費補助金(若手B、横山勝英)、及び河川環境管理財団河川整備基金の援助を受けた。現地観測においては底質コアの採取をいであ(株)高島創太郎氏および水域(株)上田浩二氏に、作業船の操縦を下筑後川漁協の塚本辰己氏に行っていた。また、河川流量データは筑後川河川事務所から、感潮域の塩分・水位データは水資源機構から提供していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 阿部澄江、横山勝英、山本浩一(2004)：白川河口域における高濁度水塊の遡上とブロック形成について、第59回土木学会年次学術講演会。
- 川西 澄・筒井孝典・中村智史・西牧 均(2005)：太田川放水路における河川流量と潮差変動に伴う浮遊砂泥の輸送特性、水工学論文集、第49巻、pp. 649-654。
- 横山勝英・山本浩一・一寸木朋也(2006)：筑後川感潮河道における地形・底質の季節変動に関する研究、海岸工学論文集、第53巻、pp. 471-475。
- 横山勝英・金子 祐・高島創太郎(2007)：温度計測に基づく感潮河道の底泥浸食過程に関する研究、水工学論文集、第51巻、pp. 877-822。
- W. T. B. van der Lee(2001)：Parameters affecting mud floc size on a seasonal time scale: The impact of a phytoplankton bloom in the Dollard estuary, in The Netherlands, Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes, Proc. in Marine Science, No. 3, pp. 403-421。