

高密度河床モニタリングに基づく底泥堆積過程の考察

High-resolution Monitoring of Sedimentary Processes in an Estuarine Channel

横山勝英¹・鈴木若菜²・高島創太郎³

Katsuhide YOKOYAMA, Wakana SUZUKAMO and Soutarou TAKASHIMA

The erosion and deposition dynamics in a highly turbid estuarine channel were successfully surveyed using an echo sounder in combination with a high-resolution acoustic Doppler profiler. While the surface level of the channel bed was stable during neap tide, it underwent fluctuations as the current velocity increased. The bed sediment was eroded by the flood tide and was found as suspended sediment. During slack high tide, the suspended sediment was deposited on the channel bed and fluid mud was formed rapidly. The fluid mud was gradually eroded by the ebb tide, and the fluid mud thickness was approximately 0.05 m per semi-diurnal cycle during spring tide. Lastly, the height of the channel bed increased by 0.8 m during a semi-lunar tide.

1. 序論

感潮河道において治水による安全確保と生態系の保全を両立させるためには、河床の堆積・浸食特性を明らかにし、河床変動を予測する必要がある。横山ら (2009a) は感潮河道への浮泥堆積について季節的な特徴を報告しているが、この原因として高濁度水塊によるSSの逆流輸送現象が考えられるため (川西ら, 2005; 横山ら, 2007), SS輸送と浮泥の発展過程の関係について詳細な研究が必要と言える。

汽水域における底泥の浸食・堆積を高精度にモニタリングした研究として、Andersenら (2007) はデンマークのKongsmark干潟において超音波乱流計 (ADV) を用いて底面剪断応力と底泥表面位置の同時測定をおこない、底泥の浸食過程を示している。

Deloffreら (2007) は、フランスおよびイギリスの3カ所の汽水域泥干潟において、超音波底面計 (Micrel Altus) による堆積過程の計測を10分から20分間隔で1年以上実施している。その結果、底面の浸食と堆積は半日周期の潮汐によって生ずるが、地形の上昇は半月周期や一月周期で進み、その原因は高濁度水塊の挙動や種々の水理的パラメーターによっており複雑であると結論づけている。この研究は重要であるが、浮泥の変動メカニズムについて未解明な点が残されている。

高濁度水塊が発生する感潮河道を対象としたものとして、Schrottkeら (2006) はドイツのWeser川感潮域においてFluid Mudの分布状況をサイドスキャンソナーと地層探査装置により詳細に調べている。しかし、高濁度水

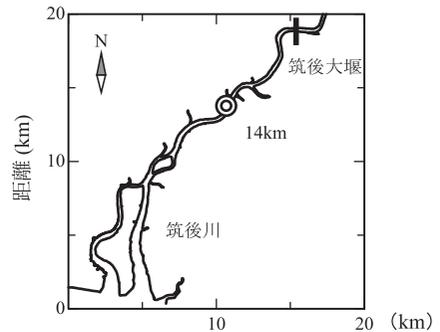


図-1 観測領域の平面図

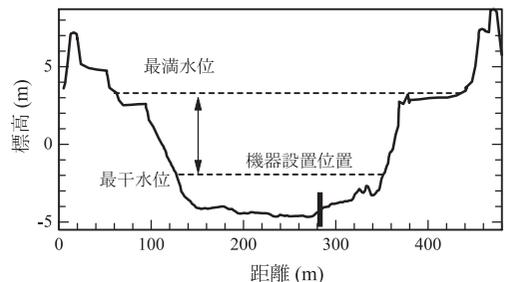


図-2 観測地点の横断面図

塊との関連性については示されておらず、感潮河道における浮泥の堆積メカニズムは不明な点が多い。

本研究では、浮泥の堆積が著しい筑後川の感潮河道を対象として、微細土砂の堆積と浮上の過程について高密度なモニタリングを実施し、その特徴について考察した。

2. 観測方法

(1) 観測場所

図-1に観測領域を示す。筑後川は河口から23km地点の筑後大堰までが感潮区間である。河床の基本構成材料

1 正会員 博(工) 首都大学東京 准教授
2 学生会員 首都大学東京大学院 都市基盤環境学域
3 非会員 いであ株式会社 九州支店

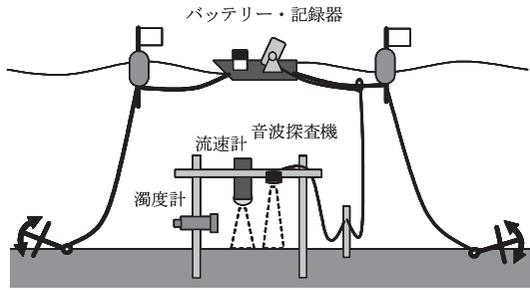


図-3 モニタリング機器の設置図

は砂であるが、8kmから20kmまでの区間では表面にシルト・粘土が多く堆積している。本研究は底泥が最も厚く堆積している14km地点を対象として実施した。

観測期間は2009年8月29日から9月12日までの15日間であり、小潮～大潮～小潮の半月周期に対応している。潮汐による干満差は小潮で約1m、大潮で約5m、干潮時の最低水深は約2mである。

(2) 観測方法

観測地点の低水路幅は約250mであり(図-2)、中央よりも右岸側の河床にFRPポールを用いて高さ1.6m、幅と奥行きがそれぞれ2mのやぐら組み立てた(図-3)。ここにクロフィル濁度計(JFEアレック, Compact-CLW)、超音波流速計(Nortek, 高解像度Aquadopp, 周波数1MHz)、デジタル音波探査機(Lowrance, LCX-27C)を設置して定点モニタリングを実施した。

濁度計は初期河床から0.4mの位置に横向きに取り付け、2分間隔で計測を行った。超音波流速計は初期河床から1.2mの地点に下向きに設置し、層厚0.05mの設定で2分ごとに計測を行った。デジタル音波探査機はセンサーを初期河床から1.6mの地点に固定し、200kHzの周波数で観測した。記録表示器とバッテリーは、全長1.2mの小型ボートに搭載して水面に浮かべ、1日おきにメンテナンスを行った。

別途、同型のデジタル音波探査機を作業船に搭載して、観測地点の河床横断測量を期間中に26回実施した。

3. 浮泥層の発達過程

(1) 横断面の浮泥層

図4～図6は14km地点の横断面における音波探査結果の代表例である。観測を開始した8月29日(小潮, 図-4)の河床材料は中央から左岸側(図の150mより左側)で砂質, 右岸側(150mより右側)では硬いシルト・粘土であり, 河床に浮泥は存在していなかった。9月7日(大潮, 図-5)になると, 中央部(図の100mから180mの範囲)の元河床の上に弱い反射が映っている。地層探査の帯域からすればかなり高い周波数(200kHz)を用いているた

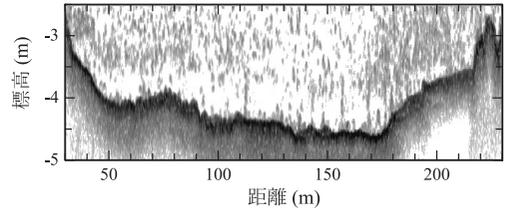


図-4 初期河床の横断図 (8月29日)

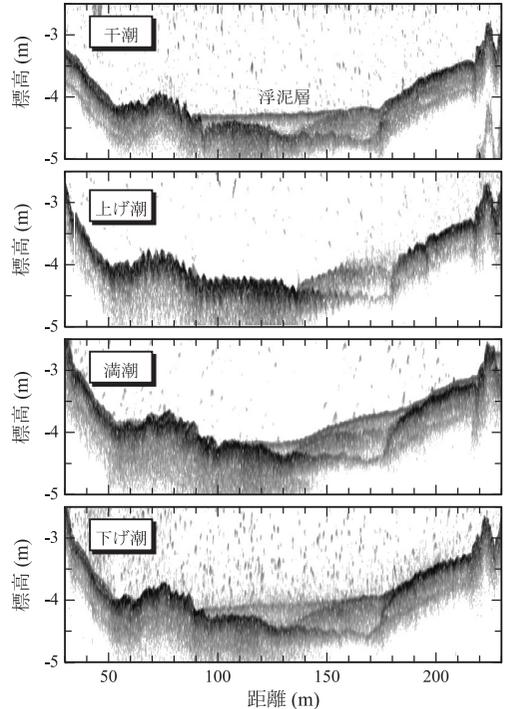


図-5 浮泥層の変動状況 (9月7日)

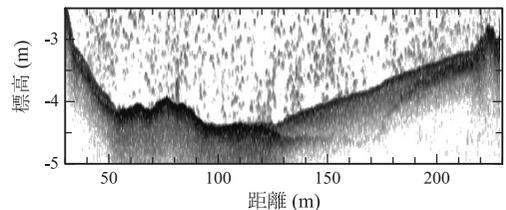


図-6 最終河床の横断図 (9月12日)

め、この映像は泥水状態の浮泥層 (Fluid Mud) を捉えていると考えられる。

9月7日の半日周期の動きを見ると、干潮では距離100mから180mの範囲に浮泥層が広がっているが、上げ潮では左半分がフラッシュされ、右側の表面もぼやけている。満潮になると150mから180mの範囲に右肩上がりの新たな堆積層が出現しており、干潮時と比べて約0.3mの上昇が見られた。下げ潮になると再度平坦な堆積層が

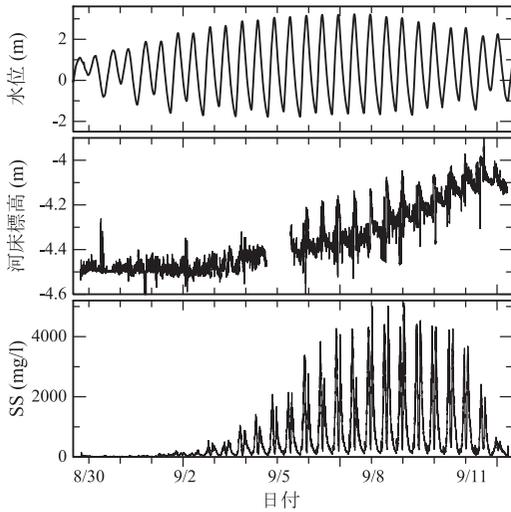


図-7 河床標高とSSの二週間時系列

広がっており、浮泥が再配分されていると推測される。

観測開始から2週間を経た9月12日（小潮、図-6）になると、125mから220mの範囲に反射強度の強い傾斜面があり、また初期河床の映像がぼやけていることから、新たな河床が形成されたと考えられる。右岸に傾斜面が形成されるのは、14km地点は湾曲部に位置し、右岸側が内岸になるためである。

(2) 底泥変動とSSの対応

図-7に潮汐と定点モニタリングで得られた河床標高、SSの時系列を示す。河床高は小潮期には明確な変化が見られないが、9月5日ごろから上下（堆積・浸食）しつつ次第に上昇してゆき、9月11日までに約0.45m堆積している。SSの日平均的な大きさと河床の上昇度合いは対応しているように見える。

次に、河床変動が最も顕著な9月8日の様子を拡大してみると図-8が得られた。河床高は干潮時に標高-4.3mであり、SS濃度は約100mg/lだった。7時20分頃から上げ潮になると超音波による河床判定が不安定になっており、それと同時にSS濃度が上昇して10時には4,300mg/lになった。したがって、流れによって浮泥表面が乱されて、その分の土粒子が水中に懸濁したと考えられる。

11時には流れが停止し、20分後に浮泥面が標高-4.1mの位置に急上昇している。SS濃度は200mg/l程度にまで急減しているため、流速が低下したことで水中の浮遊粒子が沈降して、浮泥層が厚くなったものと推測される。下げ潮になると浮泥表面の位置が徐々に低下してゆき、SS濃度は上昇する。SS濃度がピークになる13時前後には河床判定も不安定になっていることから、浮泥層の表面が削られて微細粒子が再懸濁していると考えられる。

以上をまとめると、上げ潮では浮泥層の浸食とシル

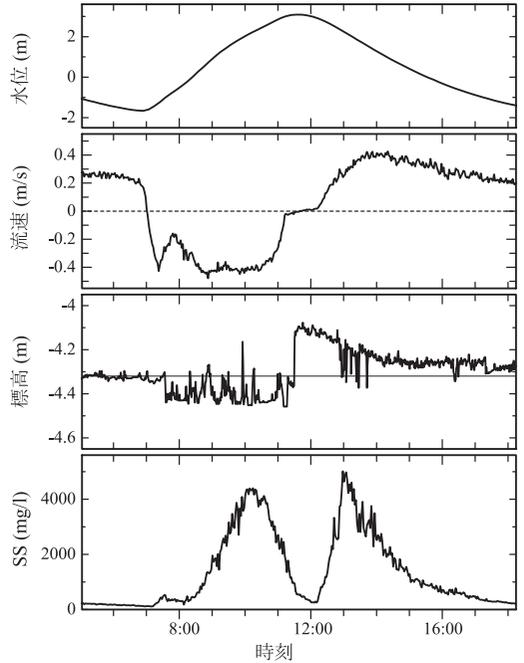


図-8 潮位、流速、河床高、SSの時系列（9月8日）

ト・粘土の水中浮遊が起こり、満潮で流れが淀む時に粒子が沈降して堆積し、下げ潮で未定着の浮泥の巻き上げが発生していると言える。一潮汐後には河床が約0.05m高くなっていることから、上げ潮によるSSの供給量と堆積量が下げ潮による移動量と浸食量を上回って、堆積が進行してゆくと考えられる。

4. SSの浮上・沈降現象に関する考察

前章では、SSデータとして初期河床から0.4mの高さに固定した濁度計による換算値を用いたが、河床が上昇すると濁度計は相対的に河床に近づいてゆく。観測期間を通じてSSの浮上・沈降現象を検討するには、底面から一定距離におけるSSデータが必要であるため、超音波流速計の反射強度からSS濃度を推定する。

(1) 反射強度によるSS濃度の推定

濁度計を設置した標高の反射強度と濁度計から換算したSS濃度の関係を図-9に示す。各潮汐から上げ潮の一時刻のデータをピックアップしてプロットした。その結果、両者には良好な相関が認められた。横山ら（2009b）はADCPの反射強度とSS濃度の相関を表す式として、次式を示している。

$$10a \log C = EL + A' \dots\dots\dots (1)$$

ここでC：SS濃度（mg/l）、EL：反射強度（dB）である。aは係数であり、1.4とした。A'は距離の関数で表される

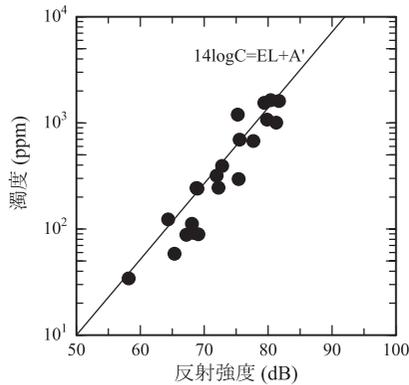


図-9 反射強度と濁度の相関

発散・吸収損失係数であり、多項目水質計で計測した濁度鉛直分布から、層ごとに図-9と同様の相関図を作成し、これに整合するように調節した。

(2) SSの変動特性

反射強度から推定したSS濃度と濁度計から換算したSS濃度の時系列を図-10に示す。上段が河床面が安定していた時期（9月5日以前）、下段が浮泥が堆積し始めた時期である。安定期のSS時系列はどちらも同程度の値を示している。一方、堆積初期のSS濃度をみると、上げ潮では同程度であるものの下げ潮になると反射強度からの推定値が半分程度の値になっている。

これは、濁度計と超音波流速計は発信波の波長が異なり、反応する粒子の大きさが異なるためと推測される。光学式濁度計は1μm程度の粘土粒子によく反応し、超音波流速計は1mm程度の大粒子に反応しやすいことを踏まえると、安定期には上げ潮と下げ潮で浮遊物の粒度構成は変化していないと考えられる。これに対して、堆積期になると上げ潮では粘土質の小粒子からフロックまで様々な粒子が存在し、下げ潮ではフロックなどの大粒子が相対的に少なくなって微細成分が主体的になるために超音波流速計の反応が弱くなっていると推測される。

(3) 底面剪断応力とSSの対応

浮泥層の表面に作用する底面剪断応力を次の要領で推定した。実測の流速鉛直分布から浮泥層部分のデータを除去し、粗面の対数流速分布則を適用する。

$$\frac{u(z)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k_s} + A_r \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u ：主流方向流速（絶対値）、 z ：河床からの距離、 κ ：カルマン係数（0.41）、 $A_r=8.5$ である。 k_s は相当粗度であり、0.1～0.25の範囲で変化させて実測流速と推定値の誤差が最小になるように最小二乗法により摩擦速度 U_* を求めた。このとき $k_s=0.139$ となった。流速の再現

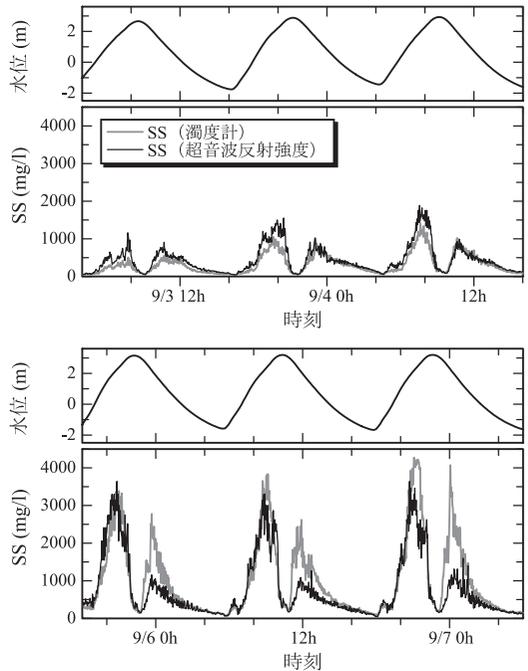


図-10 観測方法の違いによるSS時系列の比較

結果は良好であったが、これは筑後川感潮河道では強混合型の往復流が発生するためと考えられた。得られた U_* を底面剪断応力 τ に変換した。

図-11に底面剪断応力と反射強度から推定したSSの相関を潮汐別に示す。SSは浮泥表面から0.4mの高さの値を用いており、満潮・干潮の憩流付近のデータは除去している。日を追うごとに底面剪断応力が增大してそれに対応するようにSS濃度も上昇し、潮位差が小さくなる9月11日には再度、値が小さくなってゆく。

特徴的な点は、上げ潮と下げ潮の違いである。下げ潮では相関関係の勾配が日によらず一定である。これに対して、潮位差が大きくなる上げ潮（9月5日～8日）では相関関係が下げ潮と異なり、同じ底面剪断応力でも高いSS濃度が発生している。図-8や図-10と関連づけると、上げ潮では下げ潮に比べて流速が急激に増大して浮泥面が突然不安定になり、巻き上げやフロック化が活発に生じていると考えられる。また、満潮の憩流時にフロックの沈降と浮泥層の形成が進み、下げ潮では浮泥層の内部結合が徐々に進行して巻き上げられにくい状況になっている可能性がある。

さらに、剪断応力が $3N/m^2$ の時に9月4日のSSは約 $1,500mg/l$ であるが、5日は約 $2,000mg/l$ 、8日は約 $3,000mg/l$ と上昇してゆく。この原因として、小潮期から大潮期にかけて底面剪断応力が増加してゆき、その応力履歴によって底泥が巻き上がりやすい環境が形成されると推測で

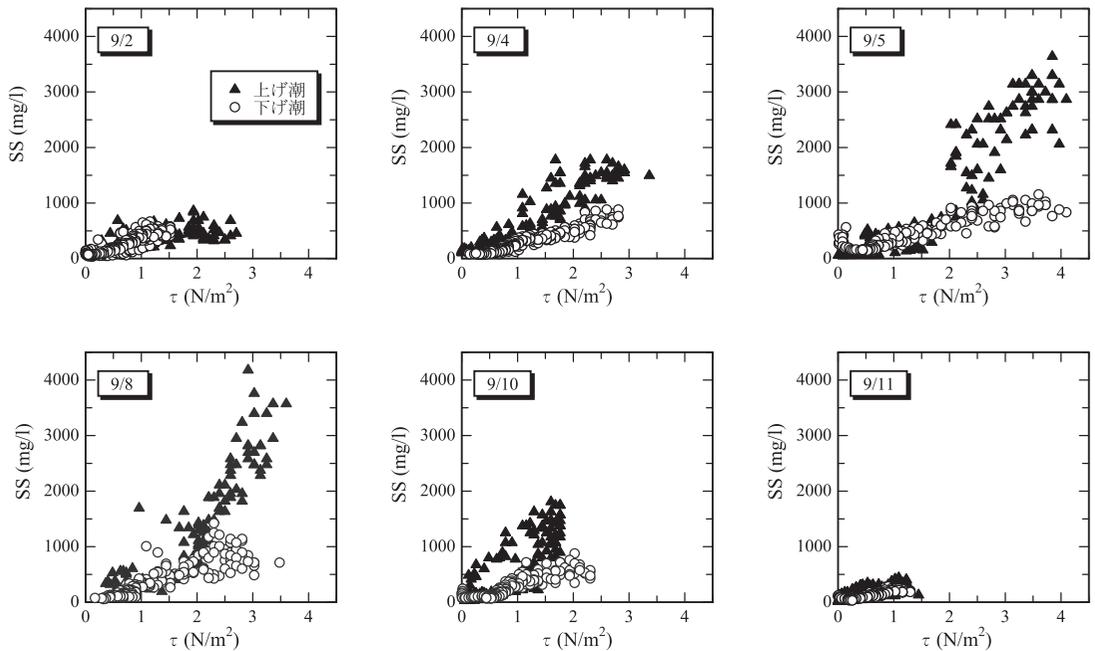


図-11 底面剪断応力とSSの相関関係

きる。また、泥の堆積が進行することで巻き上げられやすい層の厚さが増す事も一因であると考えられる。

5. まとめ

筑後川の感潮河道を対象として浮泥の堆積過程を2週間にわたって詳細にモニタリングした。半月周期の現象として、河床は小潮期には安定していたが、中潮から大潮にかけて浮泥が堆積してゆき、新たな河床面を形成していた。

また半月周期の現象として、上げ潮では浮泥面が浸食されてSSの巻き上がりが生じ、満潮の憩流時に粒子が沈降して浮泥層を急速に発達させ、下げ潮になると徐々に浸食されて、一潮汐で見たときには浮泥が残存して河床が上昇することが分かった。上げ潮と下げ潮ではSS発生状況が違うことから、浮泥層において結合が進行している可能性が考えられた。

謝辞：本研究の実施に際し平成21年度科学研究費補助金(若手B, 横山勝英)と河川環境管理財団河川整備基金(重点課題, 横山勝英)の援助を受けた。現地観測では下筑後川漁協の塚本辰己氏、首都大学東京水工学研究室の皆様にご助力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 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, 49巻, pp.649-654.
- 横山勝英・山本浩一・一寸木朋也・金子 祐 (2007)：筑後川感潮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巻, pp.451-455.
- 横山勝英・山本浩一・金子 祐・高島創太郎 (2009a)：筑後川感潮河道における底泥の横断堆積構造, 水工学論文集, 53巻, pp.1405-1410.
- 横山勝英・金子 祐・長屋光彦・山本浩一 (2009b)：筑後川感潮河道の蛇行部横断面におけるSS粒子の挙動とフラックスに関する考察, 水工学論文集, 53巻, pp.1411-1416.
- Andersen, T. J., Fredsoe, J., Pejrup, M. (2007): In situ estimation of erosion and deposition thresholds by Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol.75, pp.327-326.
- Deloffre, J., Verney, R., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S., Cundy, A. B. (2007): Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: Sedimentation rhythms and their preservation, *Marine Geology*, vol.241, pp.19-32.
- Schrottko, K., Becker, M., Bartholoma, A., Flemming, B. W., Hebbeln, D. (2006): Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler, *Geo-Marine Letters*, vol.26, pp.185-198.