

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

Cross-Sectional Distribution of Turbidity Maximum in the Meander of the Chikugogawa River Estuary

金子 祐¹・横山勝英²・山本浩一³

Yu KANEKO, Katuhide YOKOYAMA and Kouichi YAMAMOTO

The influence of a meander on a cross-sectional distribution of turbidity maximum was investigated in the estuarine channel of the Chikugogawa river. The along-river current was relatively weak and the suspended sediment concentration was high at the inside of the curve during flood tide. The river water of near-bottom layer flowed to the inside of the curve during flood tide. Furthermore, the thickness of high SS concentration layer increased during flood tide. These facts suggest that the secondary current occur in the meander of tidal channel and the suspended sediment transported by the turbidity maximum is moved into the inside of the bend. And concentrated fine particles deposit on the bed and change to the mud.

1. 序 論

河川感潮域では蛇行湾曲部の内岸側に泥質の緩斜面が形成されることがあり, 生態系にとって重要な環境となっている. 河川中流部では湾曲部において洪水時に二次流が発生し, 浮遊砂が横断方向に輸送されることで内岸側に砂の堆積領域が形成されると言われているが, 理論的研究や室内実験での研究(例えば池田ら, 1976)が多い. 実河川では低水路から高水敷へのSS輸送現象を調査した佐藤ら(2004), 渡辺ら(2000)の研究があるが, 湾曲部の二次流や土砂の横断輸送に関する調査例は少ない. また河川感潮域では高濁度水塊によるSS輸送が底泥堆積に影響を及ぼす可能性が指摘されているが(川西ら, 2005), これらは縦断二次元的な検討が多く, 感潮河道の蛇行とSS輸送の平面・横断分布に関する研究はほとんど行われていない.

そこで本研究では筑後川の感潮河道を対象として, 湾曲部の横断面において流速とSSの時間・空間変化を調査し, 高濁度水塊の横断分布特性とシルト・粘土の輸送状況について考察した.

2. 観測方法

(1) 観測場所

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, 曲率半径が1.5~3 kmの蛇行が連続している. なお, 図中の破線は県境であるが, これはかつての川筋を表しており, ショートカットにより現在の

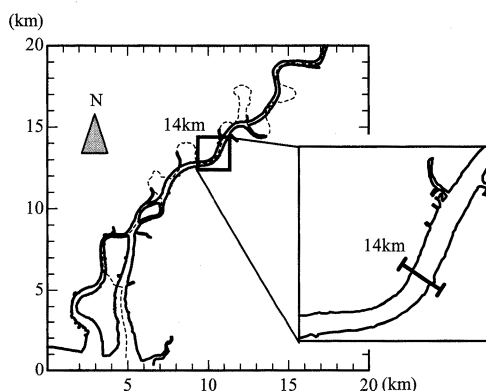


図-1 筑後川の平面図と観測領域

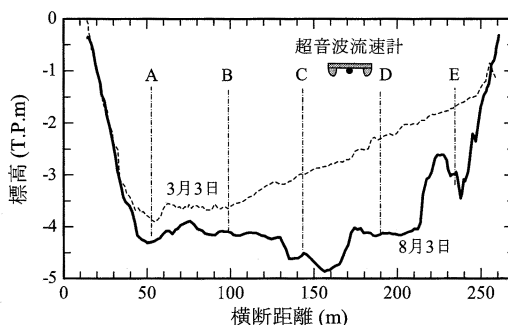


図-2 観測地点の河床横断面図(14km)

蛇行状況になっている. 河床材料は8~16 kmの区間でシルト・粘土となっており, 本研究では14 km地点に観測測線を設定した. 14 km地点は湾曲部と直線部の接合場所となっており, 河川の平面形状がSS輸送に及ぼす影響を調べやすいと考えられる.

図-2は観測地点の横断面図である. 横山ら(2007)は14 km 地点の特徴として, 洪水の直後には左右対称の比較

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

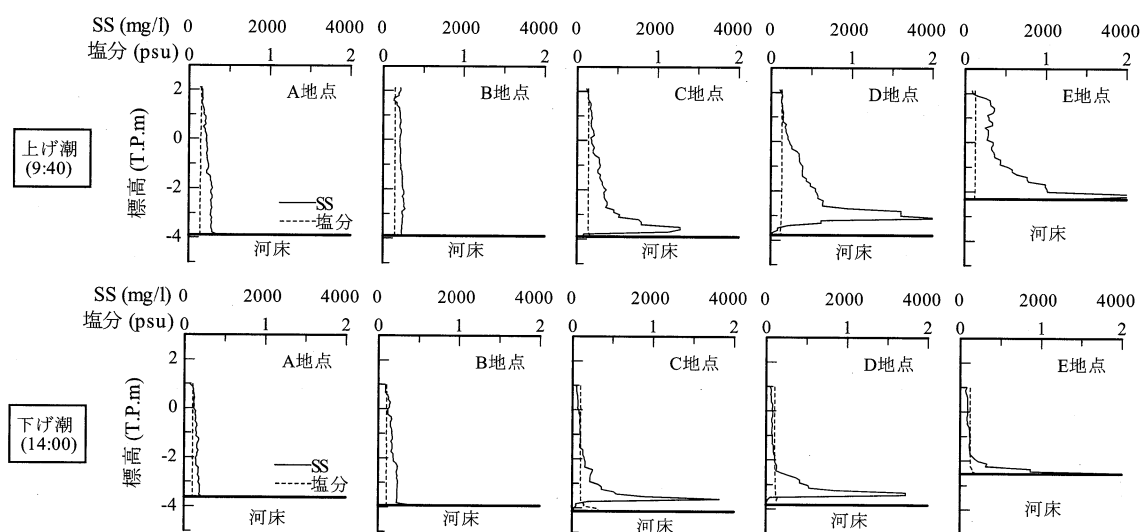


図-3 上げ潮と下げ潮のSS・塩分の鉛直分布の一例

的平坦な砂河床となるが、その後数ヶ月以内に滞筋を含めて全域でシルト・粘土の堆積がはじまり、約半年後には図中の破線で示すような右岸にかたよった傾斜平面が形成されることを示している。

(2) 観測日の潮汐・流量

観測実施日は2007年8月31日であり、沖合(三池港)の潮汐は早朝の潮高が61cm、昼の満潮が557cm、夕方の干潮が57cmであった。そのため潮汐の日潮不等は小さいと言える。

当日の河川流量(河口から25 km地点)は75 m³/sであり、筑後川の豊水流量(82.8 m³/s)と平水流量(54.1 m³/s)の間であった。

(3) 高濁度水塊の観測方法

多項目水質計(アレック電子AAQ-1183)と曳航式超音波流速計(RDI製ADCP, 周波数1.2 MHz)を作業船に搭載して、濁度・塩分と流速の鉛直分布を横断的に計測した。横断観測の往路は時速5 kmで移動しながら流速を計測し、復路は図-2のA, B, C, D, Eの5地点で停止して水質を計測した。一回の横断観測に要する時間は10分から15分であり、20分ごとに7時から19時まで観測を行い、合計で36回分の横断データを取得した。

曳航式超音波流速計は相対的な水中流速から船速を差し引いて絶対流速を出力するが、船速は2つの方法で求められている。1つは超音波の河床からの反射を利用する方法であり、この船速から求まる流速を河床参照流速と称する。もう1つはGPS測位を利用する方法であり、これをGPS参照流速と称する。本来は河床参照流速の方が精度がよいとされているが、今回の観測ではC～E地点で河床参照流速の欠測が多かったため主にGPS参照流速を用いた。

また、底泥の堆積が著しく進行する右岸側(180m)では図-2に示すように固定式の超音波流速計(Nortek製 Aquadopp, 周波数1 MHz)をFRP製の双胴ポートに取り付けて係留し、水面から下向きに流速分布を計測した。

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。分析結果から濁度-SS検定線を作成し、濁度時系列データをSSに換算した。その結果、本研究で使用した多項目水質計のSS計測限界は約4,000 mg/lであった。

3. 高濁度水塊の横断分布

(1) 観測結果

図-3はSSと塩分の鉛直分布を横断的に並べたものである。図-4は主流方向流速の横断分布図である。それぞれ上段は上げ潮での代表例、下段は下げ潮の例である。まず塩分を見ると、場所・時間によらず塩分濃度は概ね0.2 psuを示しており、鉛直方向にも一様である。満潮の前後1時間は多少上昇して0.5 psuになったが鉛直分布は一様であった。したがって強混合型の塩水遡上の先端付近で観測を実施していたことになる。

次にSSに着目すると、上げ潮では左岸でSS濃度が低く表層で約300 mg/l、下層で約500 mg/lと比較的一様な鉛直分布を示しているが、右岸に行くほど濃度が上昇し、表層は約200 mg/l、下層では濁度計のレンジ(4,000 mg/l)をオーバーしている。流速は中央よりも左岸側で強くなっており表層で最大1.2 m/sを示しているが、右岸方向に向かうにつれて減少傾向にある。一方下げ潮では、河床付近を除いてSS濃度は鉛直方向にも横断方向にも比較的一様であり、河床付近の濃度上昇は上げ潮よりも急激である。流速は中央部からやや右岸側で高い値を示してい

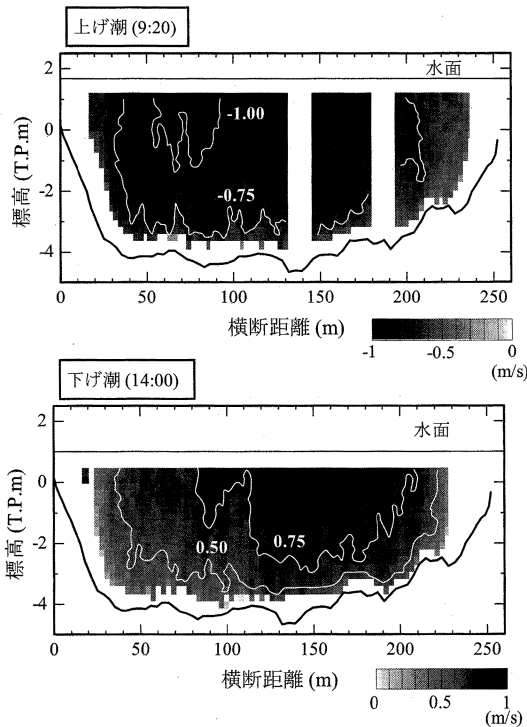


図-4 上げ潮と下げ潮の流速横断分布の一例

る。

以上のように14 km地点では横断内のSS分布、主流方向流速の分布が上げ潮と下げ潮で異なり、横断方向成分の流速も上げ潮と下げ潮では異なった。

(2) 湾曲部の潮汐往復流がSS横断分布に及ぼす影響

左岸と右岸のSS分布と流速分布の特徴が異なるため、B地点とD地点におけるSSと流速の鉛直平均値の時間変化を求めた(図-5)。SSを鉛直平均する際には濁度計の計測限界領域は除いた。この図から、上げ潮ではSS濃度がD地点の方がB地点よりも約2倍高く、下げ潮では両地点ともほぼ同程度の濃度を示している。またB地点では上げ潮と下げ潮のピークSS濃度が同程度であるが、D地点では上げ潮の方が高い。このことから上げ潮でSSが右岸側に集積していると考えられる。

次に、上げ潮と下げ潮の横断方向流速成分を図-6に示す。横断方向流速は主流速に比べてかなり小さく計測誤差の影響を受けやすいので、河床参照流速を用いて35m幅で平均した。ただし、右岸側では浮泥の影響により広い範囲で計測不能であったため、左岸側だけを示している。また右岸に向かう流速を+としている。上げ潮では表層で左岸に、底層で右岸に向かう0.1 m/s程度の流れが生じており、下げ潮では鉛直一様な分布を示している。横断成分の流速も上げ潮と下げ潮では異なった。この原因を平面的な蛇行形状から考える。図-1を見ると14 km

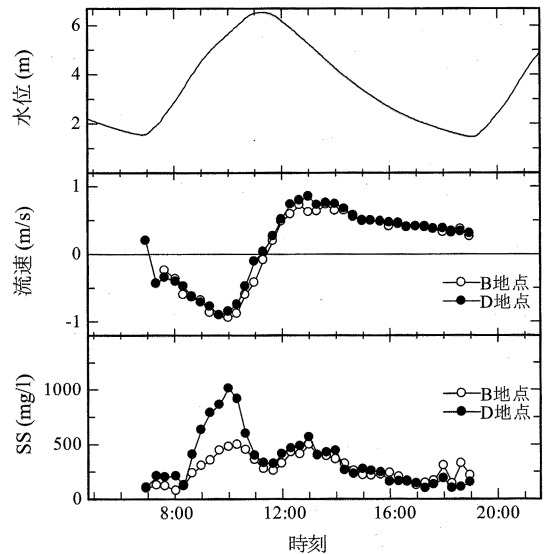


図-5 B、D地点での鉛直平均流速、鉛直平均SS

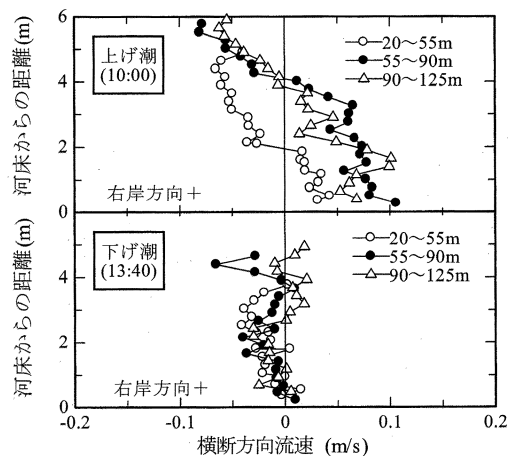


図-6 上げ潮と下げ潮の横断方向流速

地点には上流から見れば直線河道であり、湾曲部の入口にあたる。一方、下流から見ると湾曲部の出口になっている。そのため通常の河川流や下げ潮では直線開水路の流れとなり、上げ潮では蛇行によって外岸と内岸に流速差が生じ、さらに二次流が発生すると考えられる。

ここで重要な点は、14 km地点では右岸に底泥の堆積が進行することであり、これは直線開水路としての性質よりも湾曲の影響が強いことを示している。つまり、順流における直線水路としての性質が強ければシルト・粘土は両岸に堆積すると考えられるが、高濁度水塊による遡上流が卓越しているためにシルト・粘土が湾曲の2次流によって右岸側に堆積すると考えられる。

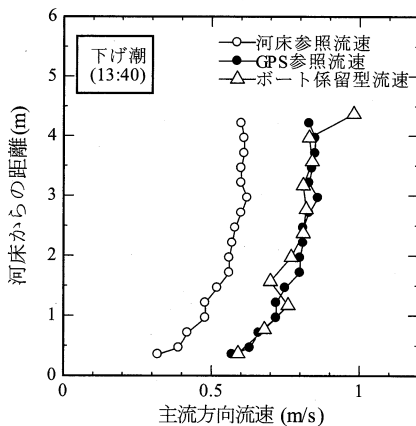


図-7 流速鉛直分布の比較(D地点)

4. SS沈殿層形成に関する考察

(1) 河床付近の流動状況

図-7に3つの方法で計測した流速鉛直分布の一例を示す。比較対象地点はD地点であり、また下げ潮時の流速鉛直分布を示している。GPS参照流速とボート係留型の流速分布はほぼ一致しておりGPS参照流速の精度には問題が無いことが分かるが河床参照流速は平均的に0.2 m/s程度低い流速を示している。

GPS参照流速と河床参照流速の鉛直平均値を計算して横断分布図に表すと一例として図-8が得られた。中央から右岸にかけて河床参照流速が不自然に低下していることが分かる。図-3に示したように右岸側では河床にSSの沈殿層が形成されているが、流動しているSS沈殿層を河床と誤認した可能性が高い。

GPS参照流速から河床参照流速を差し引いてSS沈殿層の移動速度を求めたところ、SS沈殿層の移動速度は最大で0.6 m/s程度に達していた。

(2) SS沈殿層の解析と考察

次にSS沈殿層の厚さと水中SS濃度に関してラウス分布を用いて解析する。

$$\frac{C(y)}{C_a} = \left[\frac{a}{h-a} \cdot \frac{h-y}{y} \right]^Z \quad (1)$$

$$Z = \frac{w_0}{\beta \kappa U_*} \quad (2)$$

ここで、 a ：基準面高さ(=0.05 h 、 h は水深)、 $C(y)$ ：底面から高さ(y)のSS値、 C_a ：基準面高さのSS値、 w_0 ：粒子の沈降速度、 β ：定数(=1.2)、 κ ：カルマン定数、 U_* ：摩擦速度である。

ラウス分布で表現できる領域は粒子の浮上・沈降が生

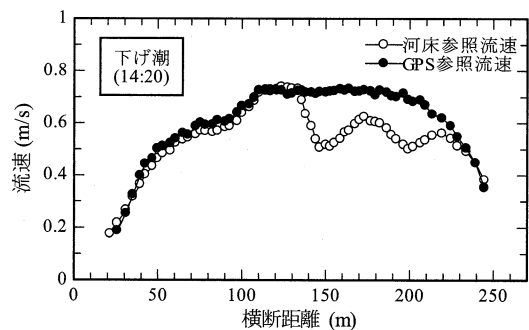


図-8 鉛直平均流速の横断分布の比較

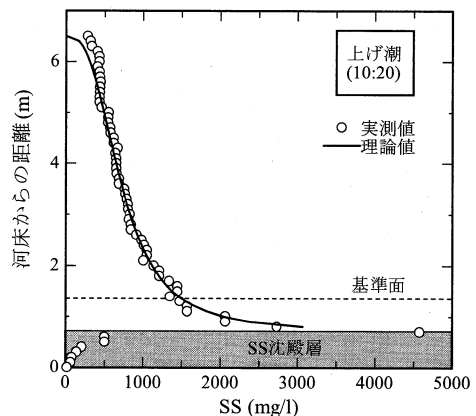


図-9 ラウス分布によるSS沈殿層表面の推定(D地点)

じている場所であり、分布に乗らない領域はFluid Mud状の粘性性流体になっていると考える。はじめにSS鉛直分布(図-3)から沈殿層の厚さを概略設定し、そこを河床とみなして上部の水深 h を求める。これより基準面高さ a と基準面濃度 C_a が決まる。

次に U_* はSS沈殿層の表面に作用する大きさを求めるため、沈殿層の表面から見たときの相対水中流速(河床参照流速)から対数流速分布則により推定する。

そして、水中部分のSS濃度分布を再現しうる粒子沈降速度 w_0 を計算する。以上の作業を最適なSS濃度分布が得られるまで沈殿層の厚さを変えながら繰り返した。推定結果の一例を図-9に示す。水中のSS濃度分布は良好に再現されており、この図ではSS沈殿層が0.8mであることがわかる。

図-10は上記の方法で推定されたSS沈殿層の厚さと基準面濃度の時系列である。基準面濃度は上げ潮のピーク時に3,200 mg/l、下げ潮のピーク時に1,500 mg/lであり、上げ潮の方が2倍高い。またSS沈殿層は時間とともに増大し、満潮となる11:30に最大値(1.2m)を示している。また下げ潮では再び沈殿層が薄くなってゆく。

別途、満潮時に音響測深器(200kHz)で河床状況を探査したところ、D地点付近では河床上0.5~1.0mの位置に

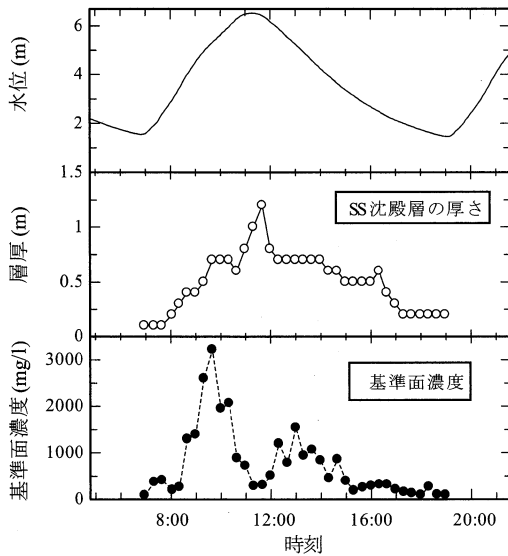


図-10 SS沈殿層の時間変化(D地点)

密度境界面が確認された。そのため、図-10の数値はSS沈殿層の濃度をどのように定義するかで増減するが、実現象からかけ離れた数値ではないと考えられる。

次に、上げ潮と下げ潮のSS濃度の特徴を見るため、2割水深でのSSと流速の相関をとった(図-11)。その結果、上げ潮の方が同じ底面流速でも3倍程度高いSS濃度となった。上げ潮では高濁度水塊が遡上する際に2次流が観測断面において発生するため、底面に沿ってSS粒子が内岸側(右岸)に輸送され、濃度の過度な上昇が生じていると推測される。

ここで摩擦速度のピーク値は約0.04 m/sであった。これは移動限界のシールズ数を0.05としたときに2 mm程度の砂粒が移動する値である。そのため堆積した浮泥がこの摩擦速度にも耐えうる状態になっていなければならないが、SS沈殿層において粘着性が発揮されるメカニズムについては今後の検討課題である。

5. まとめ

本研究では筑後川の感潮河道において蛇行が高濁度水塊の横断分布特に及ぼす影響について研究した。湾曲部の上流側で流速とSSの横断分布を計測したところ、上げ潮では湾曲外側において流速が速く、SS濃度は低かった。湾曲内側では流速が外側よりも遅く、高濃度のSSが観測された。また横断方向流速は表層で湾曲外側、底層で湾曲内側という2次流の特徴が捉えられた。

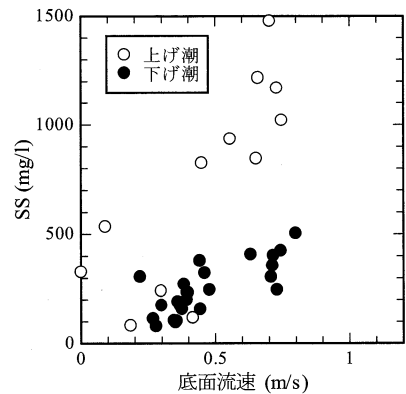


図-11 2割水深での流速とSS濃度の相関(D地点)

湾曲の上流側において蛇行特有の2次流や、それによるSS濃度の集積が見られたことから、筑後川の感潮河道では順流によるSS輸送よりも高濁度水塊の遡上によるSS輸送が卓越していると推察された。

湾曲内岸側の河床では高濁度水塊の遡上とともにSS沈殿層が形成されていたが、単体粒子の移動限界をはるかに上回る摩擦速度が作用していた。つまり、SS沈殿層では粘着性が生じて堆積が進んでいる可能性がある。

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)、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、調査機材の設置をいであ(株)高島創太郎氏に、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、首都大学東京水工学研究室のみなさまには現地観測やデータ整理などで御助力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 池田駿介・日野幹雄・吉川秀夫(1976)：河川の自由蛇行に関する理論的研究，土木学会論文集，第255号，pp.63-73。
- 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。
- 佐藤慶太・二瓶泰雄・木水啓・飯田裕介(2004)：洪水流観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の適用～江戸川を例にして～，水工学論文集，第48巻，pp.763-768。
- 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，第54巻，pp.451-455。
- 渡邊康玄・長谷川和義・橋本識秀(2000)：洪水時における浮遊物質の横断断面輸送と河岸堆積微細砂の堆積状況，水工学論文集，第44巻，pp.413-418。