

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

MOVEMENT OF SUSPENDED PARTICLES AND SEDIMENT FLUX IN THE MEANDER CROSS-SECTION OF CHIKUGOGAWA RIVER ESTUARY

横山勝英¹・金子 祐²・長屋光彦³・山本浩一⁴

Katsuhide YOKOYAMA, Yu KANEKO, Mitsuhiro NAGAYA and Kouichi YAMAMOTO

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)

³学生会員 首都大学東京 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴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)

The distributions of turbidity maximum and suspended sediment (SS) flux were analyzed in a cross section of the Chikugogawa river estuary. The relationship between the echo intensity of ADCP and SS concentration estimated from the turbidity varied spatially and temporally. The relationship shown on the inside of the meander was different from that shown on the outside, and the relationship at a high tide was obviously different from the relationship at a flood tide and that at a neap tide. These variations in the relationship were speculated to be due to the difference in the floc movement. Therefore, by using a turbidity meter and considering the echo intensity of the ADCP, we could deduce the floc condition in the turbidity maximum. The SS flux in each measurement cell was calculated using the water velocity measured by ADCP and SS concentration that was estimated from echo intensity of ADCP; the flux was integrated in each segment of the cross section by one tidal period. The total sediment budget showed that considerably more SS passed over the inside of the meander than over the outside because of the secondary current.

Key Words: *suspended sediment, ADCP, echo intensity, floc, sediment budget*

1. はじめに

河川感潮域では高濁度水塊が発生することが知られている。日本では有明海への流入河川においてSS濃度が非常に高くなり、例えば六角川では10,000 mg/l¹⁾、筑後川では2,400 mg/l²⁾に達する。高濁度水塊によるSS輸送は、潮汐の非対称性と巻き上げ限界剪断力の関係から上げ潮時に卓越すると言われており³⁾、近年、流速と濁度の連続モニタリング技術が発達したことでSSの逆流輸送に関する知見の蓄積が進んでいる⁴⁾⁵⁾。

しかし、既往の研究は縦断二次元的な観測・計算が多く、横断分布に関する検討は少ない。感潮河道の湾曲部に形成される軟泥の緩傾斜面は生態系にとって重要なハビタットであり、軟泥の堆積には高濁度水塊の横断分布が関係している可能性が考えられるが、このような一連のメカニズムに関する研究は行われていない。

高濁度水塊の横断分布について、金子ら⁶⁾は筑後川感潮河道において流速とSS濃度の分布を調査をしており、高濁度水塊の遡上時に湾曲部の二次流が発生して内岸側でSS濃度が上昇することを示している。しかし、SSのフラックスに関する検討は行われていないため、堆積との関係が明確でない。

そこで本研究では、金子ら⁶⁾の調査データを用いて、筑後川感潮河道における横断面内のSSフラックスについて検討した。また、超音波流速計の反射強度とSS濃度の相関関係を調べ、時空間的なSS粒子の挙動特性についても考察した。

2. 研究方法

(1) 研究対象地

観測対象地は筑後川の感潮河道である(図-1)。筑後

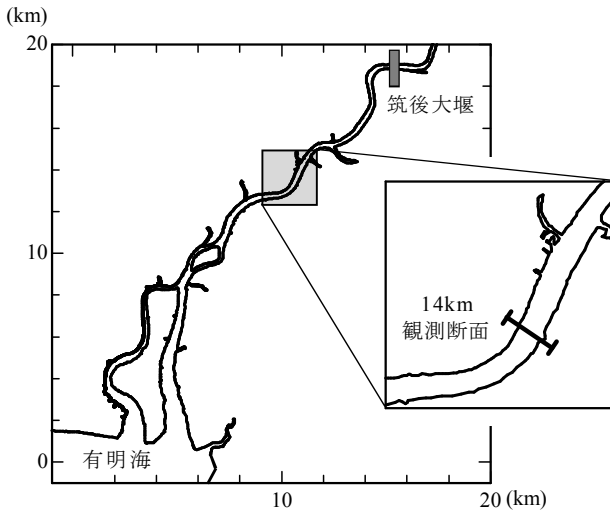


図-1 筑後川河口域の平面図と観測地点

川では、前述の通り国内で最大規模の高濁度水塊が発生するため、SS 輸送と底質形成の関係を調べる上で最適である。感潮河道は河口から 23 km までとなっており、曲率半径が 1.5 ～ 3 km の蛇行が連続している。高濁度水塊は 5 ～ 16 km の範囲で発生し、14 km 付近で最大濃度を示す²⁾。そこで本研究では高濁度水塊の運動が最も活発な 14 km 地点に観測断面を設定した。

(2) 現地観測方法

本研究では金子ら⁶⁾の調査データを使用しており、ここでは概要について述べる。

図-2 に示す 14 km 横断面において、一潮汐にわたって流速と水温・塩分・濁度の横断分布を調査した。観測実施日は大潮の 2007 年 8 月 31 日であり、海域での日潮不等は干満差の 0.7 % と小さかった。河川流量は豊水流量と平水流量の間であった。

多項目水質計（アレック電子 AAQ-1183）により塩分・水温・濁度の鉛直分布を 5 地点（A ～ E）で計測し、別途求めた濁度－SS 検定式により濁度を SS に換算した。さらに超音波流速計（RDI 製 ADCP、周波数 1.2 MHz）を曳航して、流速鉛直分布を横断方向に連続計測した。ADCP は高速発振モードで使用し、層厚が 0.25 m、データ取得間隔が約 4 秒、流速精度が 0.03 m/sec で計測した。対地流速として基本的には河床参照流速（ボトムトラックを使用）を用いたが、浮泥が堆積して超音波が河床を識別できなくなる時間・場所については GPS 参照流速を用いた。

以上の横断観測を 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。

(3) ADCP の反射強度を用いた SS 濃度推定法

現地では SS 濃度の鉛直分布を横断面内の 5 地点で計測したが、さらに詳細な横断分布を検討するために ADCP の反射強度から SS 横断分布を推定することを試みる。

SS からの音波の反射強度 EL (dB) は次式で表される⁷⁾。

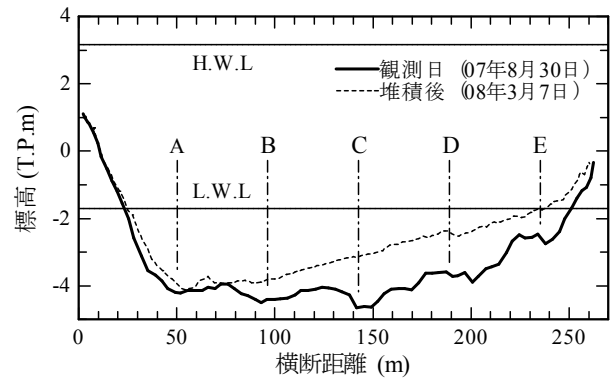


図-2 観測地点の河床横断面図 (14km)

$$EL = SL - 2TL + SV + 10 \log V_R \quad (1)$$

ここで、 SL : 発射音響強度 (dB), TL : ADCP から散乱体までの伝播損失 (dB), SV : 体積後方散乱強度 (dB), V_R : 散乱体積 (m^3) である。以下に、右边各項の内容を示す。

伝播損失 TL (dB) は次式で表される。

$$TL = 20 \log r + \alpha_w r \quad (2)$$

ここで、 r : 距離 (m), α_w : 減衰係数 (dB/m) であり、右边第一項が発散損失、第二項が吸収損失である。減衰係数 α_w は次式で表される。

$$\alpha_w = 3.01 \times 10^{-7} f^2 \quad (3)$$

ここで、 f : 周波数 (kHz) であり、本研究では $\alpha_w = 0.43$ (dB/m) となる。

体積後方散乱強度 SV (dB) は懸濁物質の濃度 C (g/m^3) の関数と仮定し、 k , a を定数とすれば次式になる。

$$SV = 10 \log k C^a \quad (4)$$

超音波流速計から r (m) 離れた散乱体積 V_R は、 v を音速 (m/s), T を送信パルス長 (sec), φ を送受波総合の音響等価ビーム幅立体角とすると、次のように表される。

$$V_R = r^2 (vT/2) \varphi \quad (5)$$

以上より、ADCP の反射強度と SS 濃度の関係は式 (1) に (2)～(5) を代入すれば、次のようになる。

$$EL = SL - 20 \log r - 2\alpha r + 10 \log k + 10a \log C + 10 \log (\varphi v T / 2) \quad (6)$$

ここで、ADCP の発射音響強度 SL は実測が難しいため、他の定数項も含めて次のように定数 A を設定する。

$$A = SL + 10 \log k + 10 \log (\varphi v T / 2) \quad (7)$$

また、ADCP はセンサー面が垂直軸に対して角度 θ で傾いているため、測定層までの垂直軸上の距離 R と実際の音波伝播距離 r との関係は次のようになる。

$$r = R / \cos \theta \quad (8)$$

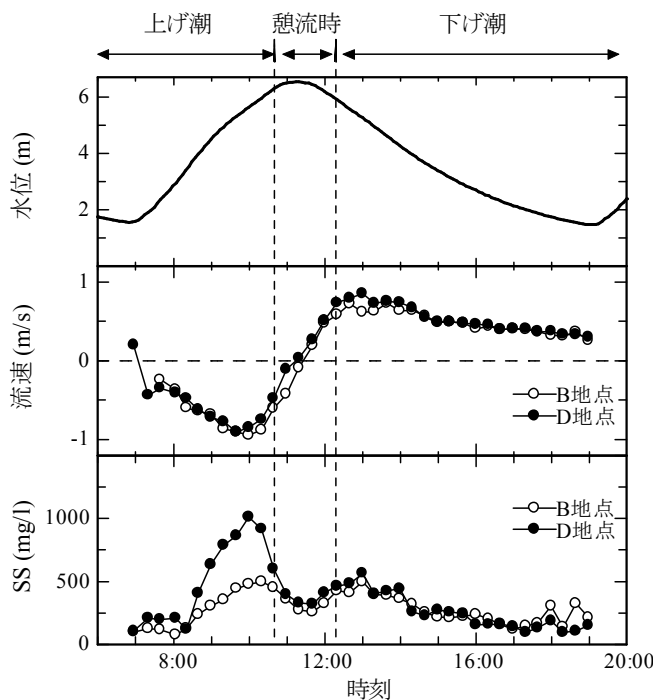


図-3 B, D地点での鉛直平均流速, 鉛直平均SS

式(6)を式(7)と式(8)で整理すれば, 次式が得られる.

$$EL = -20 \log(R/\cos \theta) - 2\alpha(R/\cos \theta) + 10a \log C + A \quad (9)$$

あるいは特定の距離に対する関係式としては, R を含む項も定数 A' として扱えば次のように簡略化される.

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

3. ADCP の反射強度から見たSS挙動特性

(1) 高濁度水塊の概況

現地の地形状況(図-1)として, 14 km 断面は蛇行部に位置しており, 湾曲の内岸側に位置する右岸に軟泥の堆積層が形成されやすい. 図-2には観測日の河床(実線)と半年後の河床(破線)を示しており, 観測日には概ね左右対称の断面であるが, 半年後には右肩上がりの斜面形状になっている. このことから, 右岸にシルト・粘土が堆積しやすいと考えられる.

高濁度水塊の発生状況は図-3に示すとおりである. 午前7時から上げ潮が始まり, 9時頃に逆流流速がピークを迎え, SS濃度も同様に最高濃度になっている. ただし鉛直平均SS濃度は左岸側のB地点では約500 mg/lであるのに対して, 右岸側のD地点では約1,000 mg/lと2倍になっている. その後, 流速の低下と共にSS濃度も下がり, 11時に満潮を迎えている. 高潮時にSS濃度が最も低くなるのは満潮ではなく, 潮が引きはじめる11時40分である. 順流になると再びSS濃度は上昇するが, 右岸D地点では上げ潮の約半分の濃度となっている.

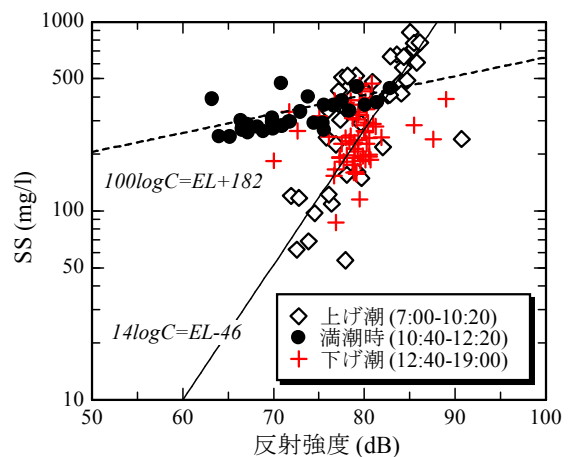


図-4 反射強度とSS濃度の全相関(水深2.57m)

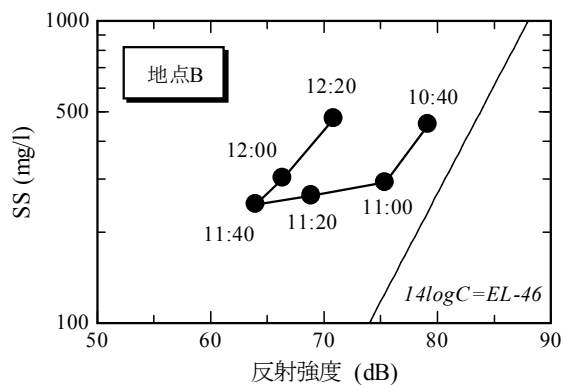


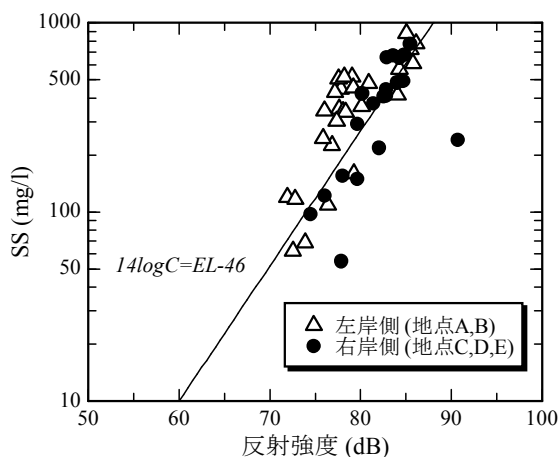
図-5 憩流時の反射強度・SS濃度の相関(水深2.57m)

(2) ADCP 反射強度とSSの相関関係

多項目水質計の濁度値から換算されたSS濃度とADCPの反射強度の関係を水深別に調べた. 代表例として水深2.57 mの相関を図-4に示す. 反射強度とSSの相関が2つの傾きで表されていることが分かり, この関係は他の水深でも同様であった. 潮汐との対応を見るために図中のプロットは上げ潮と満潮付近の憩流時, 下げ潮の3つに区分してあるが, このうち憩流時の反応が上げ潮・下げ潮と明確に異なっている. 上げ潮・下げ潮ではSS濃度が10倍になると反射強度が約14 dB増加するが, 憩流時はSS濃度が約1.4倍になるだけで反射強度が14 dB増加している.

さらに詳細に検討するために, 憩流時をピックアップして同じ地点・水深のデータをプロットすると図-5が得られた. 図中の実線は式(10)で表した上げ潮・下げ潮に対する反射強度-SS相関式である. 高濁度水塊の運動状況(図-3)と対比しながら見ると, 逆流が弱くなる11時頃から上げ潮・下げ潮の相関式から離れてゆき, SS濃度が一番落ち込む11時40分に最も離れる. その後, 順流が発達してSS濃度が上昇すると, 上げ潮・下げ潮の相関式に近づいて行く. このような往復特性はどの場所でも見られた.

憩流時と上げ潮・下げ潮時が異なった分布になる理由



図－6 上げ潮での反射強度・SS濃度の相関

として、高濁度水塊のフロック形成状況が濁度計や ADCP の計測に影響をおよぼしている可能性がある。すなわち、濁度計は赤外光で計測されており、ADCP は超音波によって計測されているため、両者の粒子に対する反応特性が異なることが考えられる。

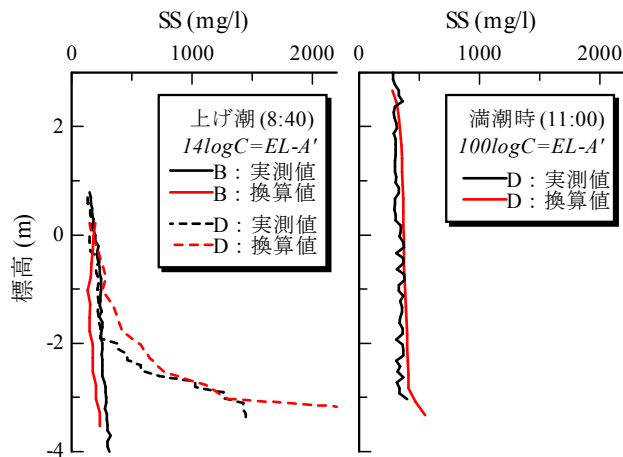
ADCP は 1.2 MHz の超音波で測定しているため、水中音速を 1,500 m/s とすると 10^0 mm 程度の粒径に対して反応が強くなる。一方、濁度計は波長 880 nm の赤外光の後方散乱強度を測定しているため、 10^{-3} mm 程度の粒径に対する応答がよい。このように各センサーが捉えている懸濁物質は大きさが 1,000 倍異なるため、懸濁物質の粒度分布が変化しない状況であれば光の散乱強度と超音波の反射強度の相関は一価の関係になるが、流況によって粒度分布が変化する場合、相関関係も変化する可能性がある。

ここで、図－4 および図－5 の縦軸を光散乱強度（濁度）と読み替えると、憩流時には光散乱強度はそれほど低下しないが、超音波反射強度は著しく低下するということになる。つまり、水中の粘土成分の沈降量に比べてフロックの沈降量の方が多く、憩流時に懸濁土砂の分級が進んでいると考えれば、図を合理的に解釈できる。また、憩流時の後半では沈降したフロックが再懸濁している可能性が考えられる。

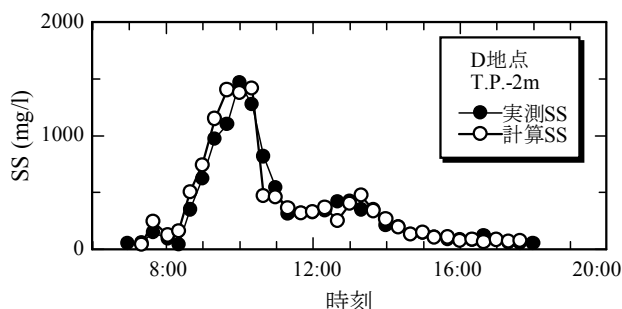
図－6 は上げ潮での反射強度－SS 相関を横断方向に分類したものである。わずかではあるが、右岸側の方が左岸側よりも同じ光反射強度に対して反射強度が強くなる傾向にある。この場合は、相関関係の傾きはほぼ同じであるから、光に反応する微粒分の濃度が等しくても右岸側の方がフロックが多いことを表している。

以上の情報を整理すると、右岸の方が上げ潮の濁度が高い、濁度が同じ条件でも右岸の方がフロック量が多い、憩流時にはフロックの沈降が進む、となるから、右岸の方が左岸に比べて SS が沈殿しやすく、底泥の形成が進みやすいと予想される。

また、測定方法の異なる光学式濁度センサーと ADCP を併用すれば水中の土砂形態が推定できる、という可能



図－7 反射強度による SS 濃度推定結果の検証（鉛直分布）



図－8 反射強度による SS 濃度推定結果の検証（時間変化）

性が示された。川西・稲田⁸⁾はこの点について実験的検討を行っており原理的にはすでに指摘されていた。しかし、現地で粒度分布の違いが明確に現れたデータは少なく、感潮河道のようにフロックが形成される場所ではこの考え方が有効であることが明らかになったと言える。

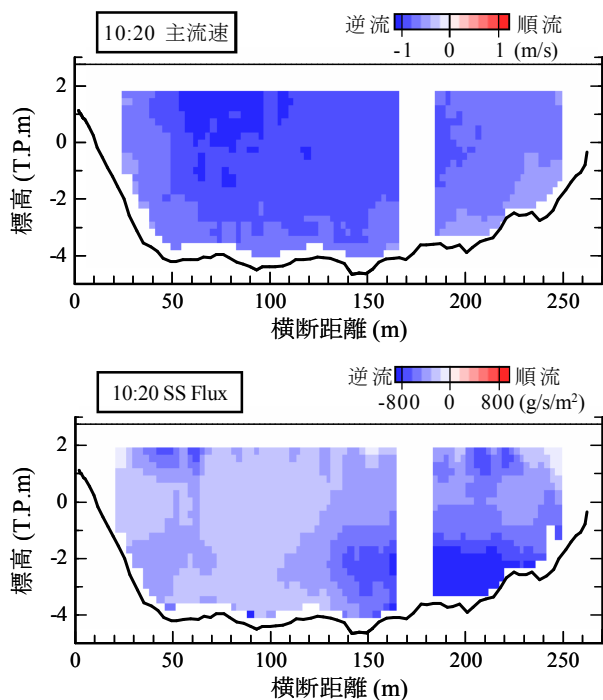
4. SS フラックスの検討

(1) SS の推定結果と実測値との比較

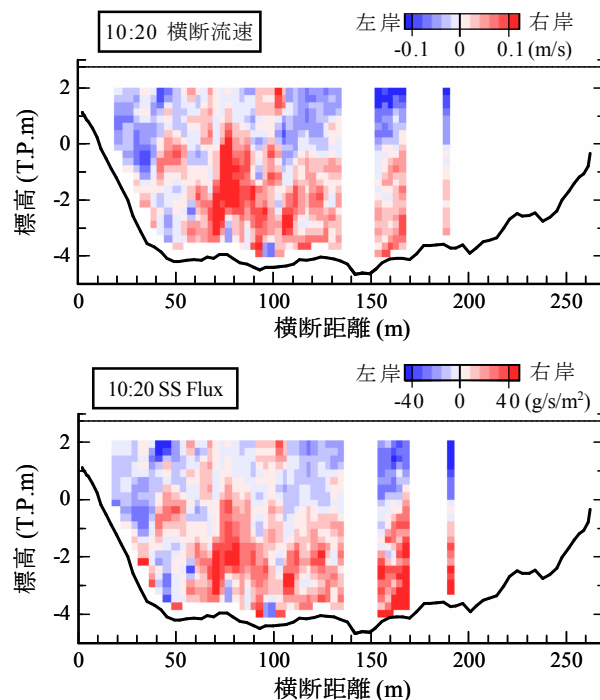
以上の結果をふまえて反射強度から SS を推定し、実測 SS と比較した。相関式は図－4 に示すように上げ潮・下げ潮と満潮付近の憩流時で分けた。図－6 に示したような左右岸でのわずかな違いは考慮せず、1 つの式とした。

最初に式(9)に基づいて距離の関数とした相関式を作成し、反射強度から SS 濃度を求めて実測 SS 鉛直分布と比較した。その結果、濃度が高くなる下層付近で推定値が 30 ～ 50 % 低下する現象が見られた。式(1)では懸濁粒子が多くなると散乱強度が増大することを想定しているが、ある濃度レベルを超えると粒子の過剰な存在により音波が透過しにくくなることを表している。そこで本研究では、濃度減衰も含めるという意味で簡略化された式(10)を用い、ADCP の各測定層ごとに相関式を作成した。

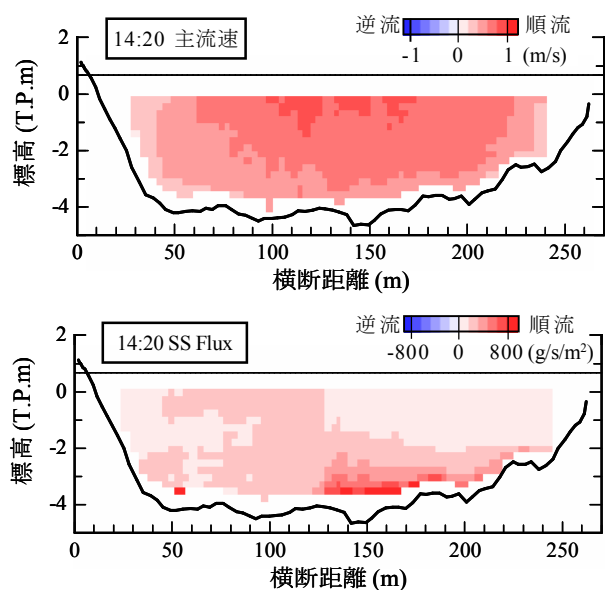
図－7 に反射強度から推定した SS 濃度の鉛直分布と実測値の比較を示す。上げ潮の左岸 B 地点と右岸 D 地点、さらに満潮時のいずれの状況でも SS 濃度の鉛直分布は



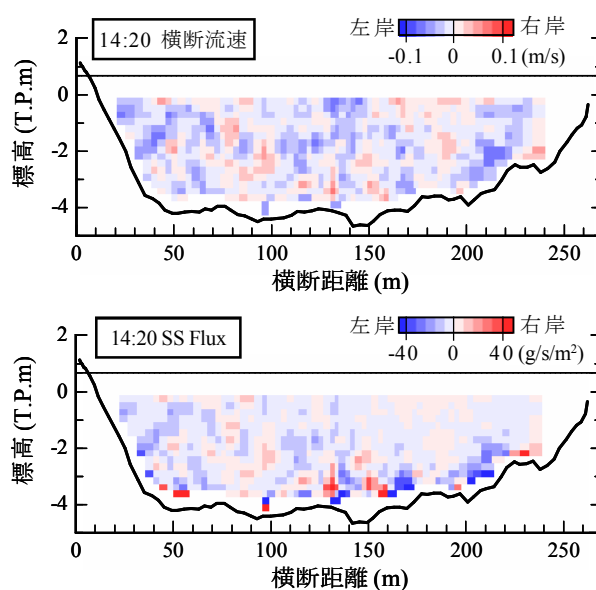
図－9 主流向流速とSSフラックスの横断分布（上げ潮）



図－10 横断方向流速とSSフラックスの横断分布（上げ潮）



図－11 主流向流速とSSフラックスの横断分布（下げ潮）



図－12 横断方向流速とSSフラックスの横断分布（下げ潮）

良好に再現されている。図－8にSS時系列の比較を示す。D地点のT.P.-2mでの値を示しており、センサーからの距離は水面変動に伴って変化している。こちらも、全ての時間帯で良好に再現されており、上げ潮・下げ潮と満潮の憩流時における関係式が妥当であることが示された。

(2) SS フラックスの横断分布特性

ADCP の各計測セルに対して反射強度からSSを計算し、流速を乗じてSSフラックスを求めた。上げ潮（10時20分）での主流方向流速とSSフラックスを図－9に示す。上げ潮では流速は中央よりも左岸側で強く、右岸側に向かうにつれて減少する傾向にある。しかしSSフラッ

クスは流速が速い左岸側よりも右岸側の中下層で高い。

同じ時刻の横断方向の流速とSSフラックスを求めると図－10が得られた。ここでは、右岸に向かう流速を+としている。横断方向流速はGPS参照流速では精度が低く解析が困難であり、河床参照流速を用いていることから、浮泥の多い右岸では欠測が目立っている。流速は主流方向にくらべて非常に弱いものの、表層付近の流速は左岸側へ、底層では右岸側へ向かっており、SSも同様にして底層では右岸へ輸送されている。

同様にして図－11に下げ潮時の主流方向流速とSSフラックスを、図－12に横断方向の流速とSSフラックスを示す。下げ潮では主流速は中央部で強く、SSフラッ

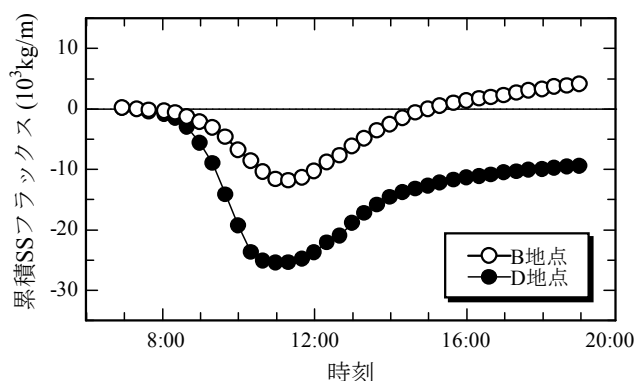


図-13 各地点の累積SSフラックス

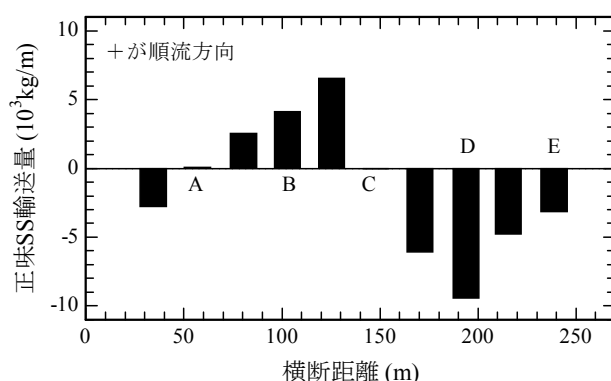


図-14 正味SS輸送量の横断分布（一潮汐累積値）

スは右岸の底面で高い。一方、横断方向流速とSSフラックスには明確な傾向は読み取れず、横断方向のSS輸送は少ないと考えられる。

この解析結果を横断方向の20 m区間ごとに平均し、累積時系列図として図-13が得られた。いずれの地点も満潮までは逆流が卓越するが、左岸側のB地点では下げ潮の途中から順流でSSが河口方向に輸送されており、右岸側のD地点では逆流遡上量が多いために、下げ潮でもSSが上流側に残る結果となっている。

また、一潮汐の正味SS輸送量を横断的にプロットしたところ、図-14が得られた。主流方向成分は左岸側で順流、右岸側で逆流が卓越しており、河道内のSS通過状況が均一でないことが明確に示された。また、全断面通過量は約 $-1.9 \times 10^6 \text{ kg}$ となり上流にSSが輸送されていた。

14 km地点は上流から見れば直線河道、河口から見れば湾曲部の出口に相当するが、以上の結果は湾曲の効果が強いことを示している。すなわち、高濁度水塊が遡上する際に湾曲部の二次流の影響を受けて、内岸側でSS逆流が卓越することが分かった。ブロックに関する3(2)の考察と考え合わせれば、右岸側はSSが通過・堆積しやすい環境になっていると言える。

5. まとめ

本研究では筑後川感潮河道において高濁度水塊の横断分布特性とSS輸送フラックスについて検討した。

横断面内で得られた超音波流速計と濁度計のデータから音響反射強度とSS濃度の対応を調べたところ、両者の相関関係は湾曲の内岸側と外岸側で異なっていた。

また、満潮付近ではSS濃度の低下よりも反射強度の減衰の方が著しく、相関関係が上げ潮や下げ潮と明らかに異なっていた。これは、ブロックの形成状態が場所や時間によって変化していることを表していると考えられ、濁度計と超音波流速計の反射強度を併用することでブロックの状態を推察できることが示された。

音響反射強度からSS濃度の横断分布を推定し、同時に得られた流速分布を乗じて断面SS通過量を計算した。これを横断区間ごとに1潮汐で積分すると、主流方向のSS

は湾曲の内岸側で逆流に、外岸側で順流になっていた。また横断方向のSSは湾曲の内岸側に向かっていった。したがって、高濁度水塊が遡上する際に湾曲の二次流の影響で内岸側をSSがより多く通過することが明らかになり、内岸側でシルト・粘土が堆積しやすい環境になっていることが示された。

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。現地観測では高濁度域でのADCP計測について、いであ株式会社高島創太郎氏にアドバイスを頂いた。また下筑後川漁協の塚本辰己氏には観測の様々な面でご助力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 二渡了, 楠田哲也, 大石京子: 強混合河川六角川感潮部における懸濁物質濃度の変動特性, 土木学会論文集, 第452号, II-20, pp.71-79, 1992.
- 2) 横山勝英, 宮崎晃一, 河野史郎: 筑後川感潮河道と有明海奥部における高濁度水塊の広域移動に関する現地調査, 水工学論文集, 第52巻, pp.1339-1344, 2008.
- 3) 西条八束, 奥田節夫: 河川感潮域, 名古屋大学出版会, pp.85-96, 1996.
- 4) 川西澄, 筒井孝典, 中村智史, 西牧均: 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, 2005.
- 5) 横山勝英, 宇野誠高, 森下和志, 河野史郎: 超音波流速計による浮遊土砂移動量の推定方法, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1486-1490, 2002.
- 6) 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.
- 7) 山本浩一, 横山勝英, 森下和志, 高島創太郎, 河野史郎, 末次忠司: 白川河口域における土砂・栄養塩収支, 河川技術論文集, 第11巻, pp.53-58, 2005.
- 8) 川西澄, 稲田景: 超音波流速計による浮遊粒子の粒径を考慮した浮遊砂濃度の推定法, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1401-1405, 2006.

(2008. 9. 30受付)