

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観測

FIELD MEASUREMENT ON THE TURBIDITY MAXIMUM MOVEMENT IN THE CHIKUGOGAWA RIVER ESTUARY AND THE ARIAKE SEA

横山勝英¹・宮崎晃一²・河野史郎³

Katsuhide YOKOYAMA, Kouichi MIYAZAKI and Shirou KAWANO

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非会員 修(理) 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)

Intensive field measurements of the turbidity maximum movement were undertaken in the Chikugogawa River mouth estuary and tidal flat. The estuary has two channels - the main channel and a subchannel called Hayatsuegawa. The vertical profiles of the suspended sediment concentration (SSC) and salinity were measured at 20 stations along the Chikugogawa River course. The current profile was monitored by ADCP at six stations. The SSC and salinity are highly correlated; the SSC grow up in front of the salt-wedge maximum concentration. A significant relationship is observed between the SSC and bottom shear stress at the upstream stations, but there is no correlation at the downstream stations along the main channel. The suspended sediment loads on the tidal flat and in the upstream channel are much higher during flood tides; on the other hand, the main channel discharges the suspended sediments into the sea. These facts suggest that the turbidity maximum occurs on the tidal flat, and the suspended particles intrude into the Hayatsuegawa channel. Further, since these intrusions run up to the upstream channel, the suspended particles settle on the upstream bed as well.

Key Words: *Turbidity Maximum, salinity, shear stress, sediment budget, bed material*

1. はじめに

河川感潮域では塩水遡上と共に高濁度水塊が発生して懸濁土砂(SS)が輸送されるが¹⁾, SS輸送現象にはいくつかの意味がある。一つはSSが感潮河道でフロックを形成して沈積し、河床に底泥層を形成することである。それにより河床には沈降速度が理論上3オーダー異なる砂とシルト・粘土が混在することになり、河床材料の多様性が底生生物の生息環境を規定する。一方で、河床や漁港に底泥が堆積することは流水や航行を阻害するため、河川管理者や漁業者にとって悩ましい現象である。

もう一つはシルト・粘土は比表面積が大きく多量の栄養塩を付着させているため、日常的なSS輸送が感潮河道や河口沿岸の物質輸送に重要な役割を果たしていると考えられることである。高濁度水塊は河川(陸域)と海域を往復運動していることから、栄養塩輸送におけるバッファゾーンとなっている可能性が高い。

そこで本研究では、高濁度水塊が河川感潮域や沿岸域の地形・底質形成、栄養塩動態に及ぼす影響を明らかに

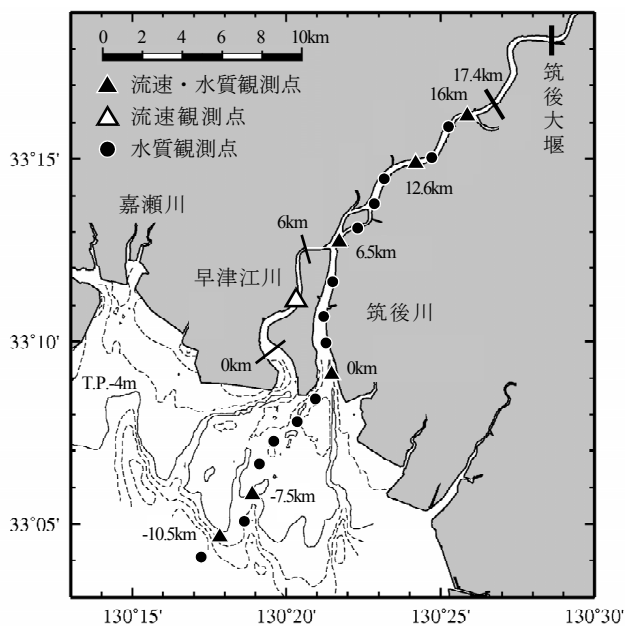
するための基礎的な段階として、高濁度水塊の広域移動特性について筑後川および有明海を対象に検討する。

有明海湾奥部では近年、漁業環境の変化や透明度の変化²⁾が指摘されており、SS移動現象に関する調査研究が進められつつある³⁾。これらは海域に限って検討されているが、筑後川の河口干潟や感潮河道をSSの有力な供給源あるいは吸収源として取り扱うことが重要であると考えられる。筑後川感潮河道での高濁度水塊については過去に満田⁴⁾と代田⁵⁾が調査しており濃度分布の概況は示されているが、移動フラックスや河床材料との関係などにおいて未解明な部分が多い。

2. 研究方法

(1) 研究対象地の概要

図-1に筑後川河口域の平面図を示す。筑後川は流域面積が2,860 km²、幹川流路延長が143 kmの河川であり、有明海湾奥部に流入する淡水のうち約7割を供給している。感潮区間は河口から23 kmに設置された筑後大堰ま



図－1 筑後川河口域の平面図と観測地点

でとなっているが、17.4 km 地点には天端高が T.P.-1 m の床固めが設置されており、日常的な塩水遡上が床固めを乗り越えることは少ないようである。

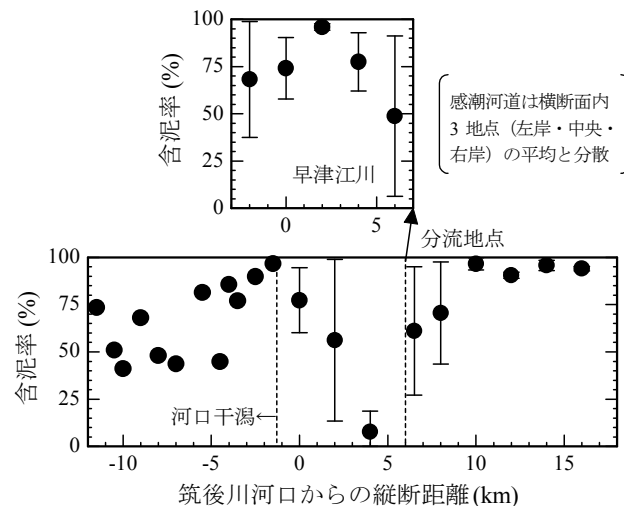
河口から約 7 km の区間は本川と早津江川に分流している。河川管理上の距離標 0 km は実際の海域よりも少し内陸に位置し、平面図上の干潟と河川の境界は筑後川では -1.5 km 付近、早津江川では -2.5 km 付近になる。2 河川の流量配分は、計画高水流量では本川が 7,200 m³/s、早津江川が 3,100 m³/s とされているが、低水流量がこの比率で流れているかどうかは不明である。

河口は有明海の北東部に位置し、河口干潟は約 45km² と広大な面積を誇る。有明海の特徴は、潮位変動が最大で 6m に達することと、沿岸域にガタ土と呼ばれるシルト・粘土が広く分布していることにあり、筑後川の感潮河道もそれらによって特徴付けられている。

(2) 現地観測方法

現地観測の範囲は塩水遡上の先端付近と予測される河道 16 km 地点を上流限界とし、河口テラスの縁辺部（筑後川河口 0 km から計測して -12 km）を下流限界とした。図－1 に示す計測地点において、移動観測、設置機器による流速モニタリングと底質採取を実施した。

移動観測では、作業船に D-GPS と多項目水質計（アレック電子 ACL208-DK）を搭載し、約 1.5 km ごとに設定した観測点において濁度、塩分、水温の鉛直分布を計測した。作業船は 3 班を編制し、それぞれが 8 ～ 10 km 区間を分担して、高速移動しながら 45 分以内に 7 地点の水質計測を行った。観測日は大潮にあたる 2002 年 9 月 23 日と 9 月 24 日であり、各日の日中に 1.5 時間間隔で 8 セットの計測を行った。別途、濁水の採水分析を行って濁度－SS 相関式を作成し、多項目水質計の濁度値を SS 濃度に換算した。



図－2 筑後川、早津江川、河口干潟の底質縦断分布

なお、西側の支川である早津江川では移動水質観測は実施していない。

流速鉛直分布のモニタリングは図－1 の▲地点で行い、Nortek 製 Aquadopp（周波数 1 MHz ないし 2 MHz）を河床の最深部に埋設し、センサー部を 0.2 m 程度露出させた。これとは別に流心部の流速の代表性を調べるため、曳航式超音波流速計（RDI 製 WH-ADCP, 1200kHz）を用いて各地点の流速横断分布を 12 時間に渡って計測した。横断観測は大潮にあたる 2003 年 1 月 21 日～24 日に実施した。

河床及び干潟の底質採取は図－1 に示す観測ラインと早津江川で行ったが、採取地点は水質計測点とは異なる。筑後川感潮河道と早津江川では 2 km 間隔で横断面を設定し、低水路流水部の左岸、中央、右岸の 3 箇所で底質を採取した。干潟では概ね 1 km 間隔で採取した。採取日は 10 月 9 日と 10 日であり、底質の粒度分布を分析した。

3. 高濁度水塊の観測結果

(1) 河床材料の分布

高濁度水塊の起源、沈殿生成物となりうる底質の分布状況を図－2 に示す。感潮河道では 10 ～ 16 km の範囲で含泥率（シルト・粘土含有率）が 90 % を越えており、有明海特有のガタ土が河床を覆っている。2 km, 6.5 km, 8 km では河床に砂質領域と泥質領域が混在しており、4 km ではほぼ全体が砂である。

図－2 の上段に示す早津江川では分流点に近い 6 km において砂と泥の場所があり、筑後川の 6.5 km と同様の状況となっているが、それよりも下流側では平均含泥率が 74 ～ 96 % であってシルト・粘土の支配率が高い。分流点よりも河口側の 2 河川を比較すると、筑後川では含泥率が 4 km 地点を最低とする下に凸の分布形をしており、早津江川では 2 km 地点を最高とする上に凸の分布形をしている。隣り合う 2 河川で河床材料の分布状況がかなり異なり、早津江川の方がシルト・粘土の分布域が広いこと

から、土砂輸送の形態も異なる可能性が考えられる。

河口干潟では河川・干潟の境界である -1.5 km において含泥率が最大であり、干潟上では砂混じりのシルト・粘土となっている。

(2) 観測実施日の諸条件

図-3 に観測日の干潟、河口、河道の水面標高を示す。水面の時間変動を詳細に見るため、超音波流速計により取得した 10 分間隔の水位データを標高に換算している。干潟 7.5 km 地点は沖合の毎時潮位との差が 0.1 m 以内であるため、海域の潮汐を表現している。

観測日の潮汐は干潟地点 (-7.5 km) において、朝と夕の干潮がそれぞれ T.P. -1.83 m と -1.73 m、昼の満潮が 2.50 m であり、日潮不等の差が干満差の 2.3 % であることから、潮汐はほとんど対称と考えてよい。2002 年及び 2003 年の海域の朔望平均満潮位は T.P. 2.55 m、干潮位は T.P. -2.31 m であるため、調査日の大潮は満潮位においては平均的、干潮位は平均よりも高いということになる。

河川の条件としては、観測日の流量 (25.5 km) は 38 ~ 40 m³/s であり、低水流量 (42 m³/s) と濁水流量 (33 m³/s) の間にある。また、筑後大堰放流量は 29 ~ 30 m³/s である。筑後川のタイダルプリズムから推測される潮汐流量は約 1,300 m³/s であるから (早津江川を除く)、感潮河道において淡水流量は潮汐流量の 2.3 % に過ぎない。

以上より、観測を実施した 2002 年 9 月 23 日、24 日は、海域の満潮位は平均的な大潮であり干潮位は平均よりも高く、河川流量は年間でも少ない時期に相当する。そのため、塩水が 1 年のうちで最も遡上しやすい時期に相当すると考えられる。

潮汐の伝播時間は干潟-7.5 km から河口 0 km では干潮で約 30 分、満潮で約 5 分、河口から河道 16 km にかけては干潮で約 90 分、満潮で約 30 分であり、感潮河道では干潟域に比べて潮汐の時間遅れが顕著になる。また、上げ潮の時間が 4.5 時間に対して下げ潮が 7.5 時間であって、ほとんど潮汐流量で移動しているため、逆流流速が卓越することになる。

(3) 高濁度水塊の運動

図-4 に観測潮位、塩分、SS、流速の縦断分布図を示す。8 回の観測を上から順に R1 ~ R8 として呼称する。

塩分濃度は概ね表層から底層まで一様に分布しており、流速分布も表層と底層で流向の反転が無いため、強混合の塩水遡上形態であるといえる。濃度の縦断勾配は 5 ~ 25 psu の範囲で急であり、グラフから塩水フロントは概ね 2.5 psu 付近にあると考えられる。

R1 は上げ潮の初期であり、塩水フロントは河口から約 3 km 内陸側に遡上し、高濁度層は塩水フロントの上流域 (3 ~ 15 km) に存在する。R2 では塩水フロントが 7 km に、R3 では 10 km に移動し、高濁度層も塩水フロントに押されるように上流側に移動してゆく。最も SS 濃度が高い

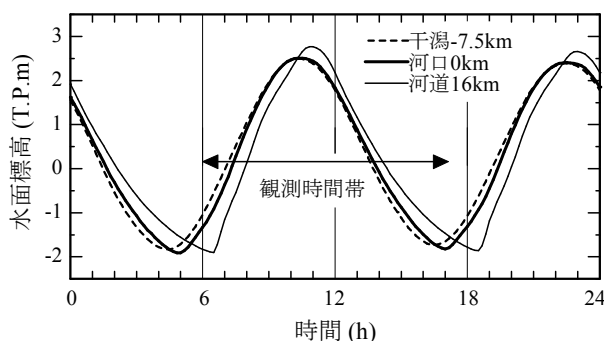


図-3 各地点の水面標高 (2002 年 9 月 24 日)

12.6 km では R2 において表層が 2,060 mg/l、底層が 2,800 mg/l、水深平均値では 2,390 mg/l となっている。ここで、太平洋に面する利根川の高濁度水塊は約 50 mg/l⁽⁶⁾、東京湾に流入する多摩川では約 150 mg/l⁽¹⁾ であり、日本の多くの河川はこの程度の濃度レベルであると考えられる。有明海では、白川において約 700 mg/l⁽⁷⁾、六角川では約 20,000 mg/l⁽⁸⁾ になり日本の中でも特に濃度レベルが高いが、筑後川は六角川に次いで高濃度が発生する河川であると言える。

満潮となる R4 では、塩水フロントが 15 km まで到達して流れが停滞し、7 ~ 16 km の範囲で表層・中層の SS 濃度がかかなり薄くなり高濃度域は底層に分布している。R3 から R4 にかけて高濃度層が鉛直下向きに移動していることから、懸濁粒子の沈降が進んでいると推測される。

下げ潮となる R5 ~ R8 では、塩水フロントが 1.5 km まで後退し、観測期間の塩水遡上距離は 13.5 km であった。高濁度層の発生領域と塩水フロントの関係は上げ潮と概ね同じであるが、下げ潮 (R5 ~ R7) では上流側の河床付近に濃い SS が存在しており、満潮時の河床沈殿 SS が巻き上げられているように見える。

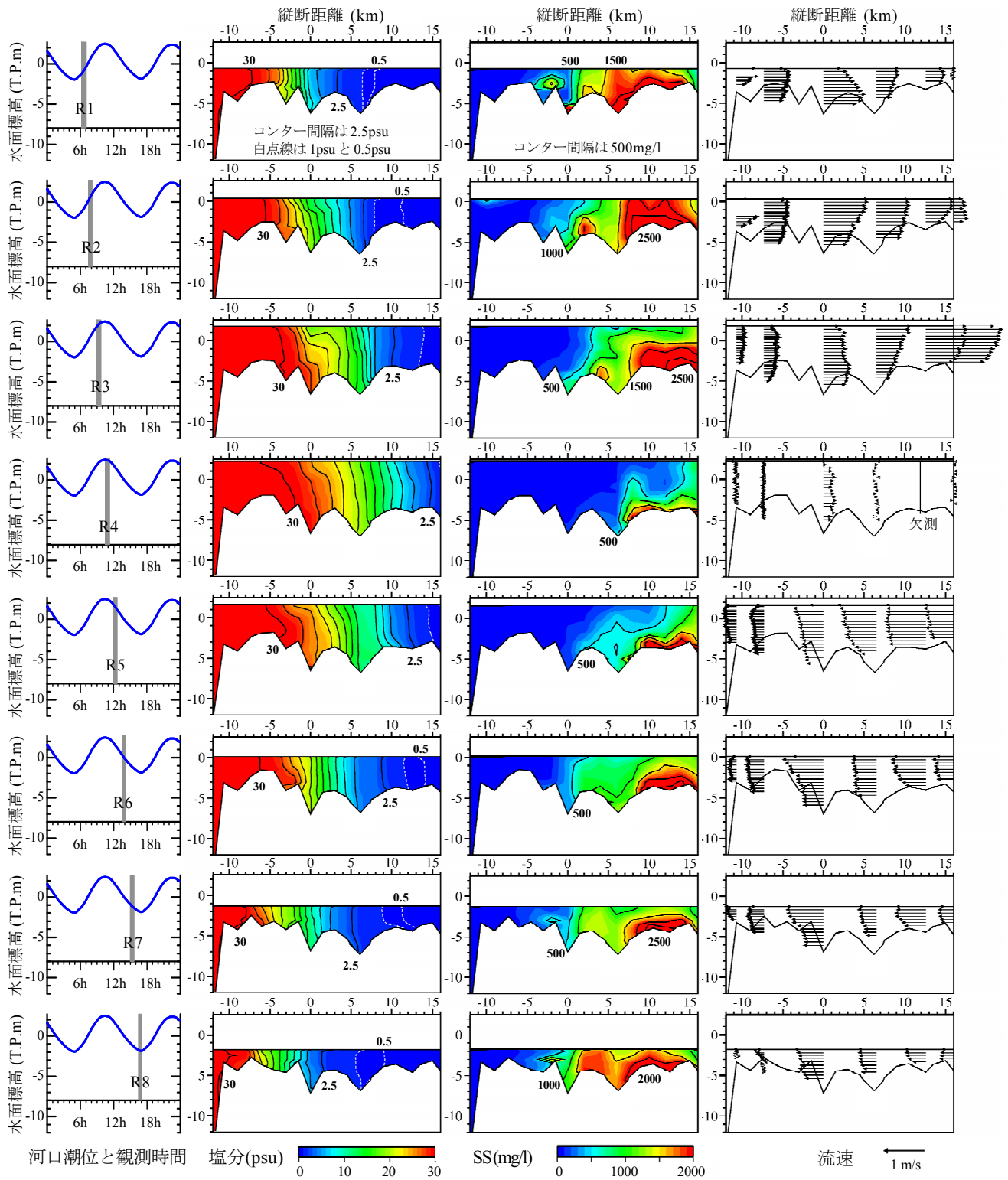
以上より、筑後川の高濁度水塊は塩水フロントから上流にかけて発生が顕著であることが分かった。ただし図-4 からは、鉛直一次的に河床材料が巻き上がり沈殿を繰り返しているだけなのか、海域もしくは河川上流域からの SS 供給が存在するのかわかりとしない。

4. 高濁度水塊の発生要因と移動フラックス

(1) SS 発生と底質、塩分、流速の関係

高濁度水塊の発生要因として、河床材料 (図-2) と SS 分布状況 (図-4) を比較する。図-4 によれば SS は 7 ~ 16 km の範囲で濃度の上昇が顕著であり、0 ~ 5 km では干潮時の R8 を除けば相対的に濃度が低い。この分布は河道の含泥率と対応がよく、含泥率が高い上流域では SS 濃度が高く、含泥率が低い河口付近では濃度が低い。ただし、海域では含泥率が 40 ~ 95 % と比較的高い地点も多いが感潮河道のような濃度上昇は見られない。

次に、塩分と SS の相関を図-5 に示す。塩水移動と SS 発達の関係を見るために沈殿状態 (R4 と R5) は除外し、海域も含めた全地点の鉛直平均濃度を比較した。塩分濃



図－４ 高濁度水塊の観測潮位と塩分、濁度、流速の縦断分布（2002年9月24日）

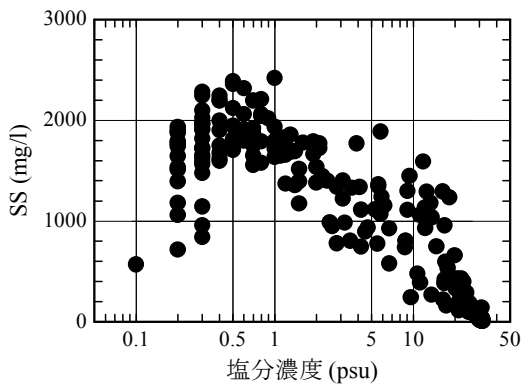
度が0.5～31 psuの範囲で負の相関が見られ、塩分が約0.5 psuの時にSSは最大となっている。0.5 psu以下になるとSS濃度の分布が大きく、両者の相関は明確でない。

図－6は感潮河道における底面剪断応力と底層SSの関係である。この図でも沈殿状態（R4とR5）は除外し、SSは河床から1mまでの平均値を取っている。底面剪断応力 τ_0 は次式で表される滑面の対数流速分布式から求めた。

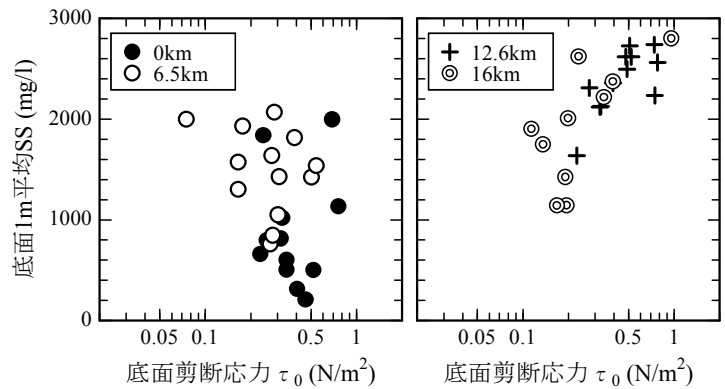
$$\frac{\bar{u}(y)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* y}{\nu} + A_s \quad (1)$$

$$\tau_0 = \rho u_*^2 \quad (2)$$

ここで、 y ：底面からの距離、 $\bar{u}(y)$ ：流速鉛直分布、 u_* ：摩擦速度、 κ ：Karman 定数 (=0.4)、 ν ：動粘性係数、 A_s ：定



図－5 感潮河道食および干潟における塩分とSSの相関



図－6 底面剪断応力と底面SSの相関

数(=5.5), ρ : 水の密度である。超音波流速計の実測流速と(1)式による理論流速の残差が最小となる摩擦速度 u_* を求め、(2)式により底面剪断応力に変換した。底泥の巻き上げや移流拡散は、底面剪断応力とSS増加分との関係から解釈すべきであるが、今回はSSのデータ間隔が1.5時間と長いことから時間微分による議論は困難と考え、SSとの関係から考察を進める。

0 kmと6.5 kmでは底面剪断応力とSSに相関が見られず、塩水遡上の先端域である12.6 kmと16 kmでは底面剪断応力の増大に伴ってSSが上昇している。ただし一般には、巻き上げ限界剪断応力(0.2 N/m²程度)を越えた状況でSSが再懸濁すると言われるが⁹⁾、12.6 kmと16 kmでは常に濁っているためSSが0付近の状況が分からない。

以上の情報を総合すると、筑後川における高濁度水塊の運動は次のように考えることが出来る。塩分とSSに良い相関があり、塩分が0.5 psuでSSが最大となったことから、SSは塩水フロントで発生していると言える。感潮河道の0 kmと6 kmでは底面剪断応力とSSの間に相関が見られず、かつ河床材料の含泥率が比較的低い。そのため、この区間ではSSの発生として河床からの巻き上がりよりも他水域からの移流が支配的であると考えられる。

感潮河道の12.6 kmと16 kmでは河床材料がシルト・粘土であり、かつSSが底面剪断応力に比例して増大することから、SSが河床からの巻き上がりで発生している可能性がある。ただし、この区間では常に濁っており巻き上げの限界剪断応力を確認できないことや、満潮の憩流時にはSS濃度が河床付近に集中することから、SSが沈殿して短期的に形成されるFluid Mud状の表層浮泥が発生源である可能性も考えられる。さらには、下流からの移流成分も加わると推測される。

(2) SS フラックスの計算方法

高濁度水塊の移動特性を詳細に調べるために、SSフラックスを計算する。流速・SS鉛直分布と各水深層の断面積を乗じ、積分することでSSフラックスを求めるが、横断方向の分布を考慮して補正する必要がある。

流速補正のために別途、流速鉛直分布の横断観測を実施したところ、断面内で流速の逆転は見られず強混合型

の均整な順流・逆流が生じていた。流速横断分布から計算した断面流量を真値として設置型流速計の補正係数を求めたところ、例えば16 km地点では順流時の係数が0.95であるのに対して逆流は0.81となり、全地点で順流と逆流の補正係数が異なった。したがって、河道の蛇行の影響により上げ潮と下げ潮で流況が変化していると推測される。SSについては横断方向の情報が無いため、均一と仮定して補正は行わなかった。

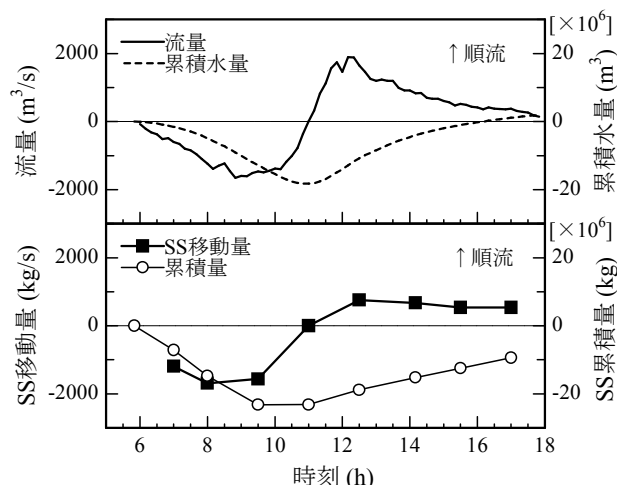
(3) 計算結果

図－7に感潮河道6.5 kmにおける水とSSの通過状況を示す。流量は逆流最大が1,650 m³/s、順流最大が1,900 m³/sに達し、筑後大堰からの淡水流量が約30 m³/sであるから、潮汐流が支配的である。一潮汐の累積水量はプラスで、流量に換算すると順流方向に43 m³/sとなり、淡水流量と概ね整合している。SSは逆流時の通過量の方が順流時よりも2倍程度大きく、12時間のフラックスは逆流方向に 9.4×10^6 kgとなった。つまり、流量は順流が卓越しているがSSは逆流が卓越していることになる。

図－8に各地点の1潮汐における残差流量とSSフラックスを示す。干潟の値は単位幅あたり水深積分値である。早津江川では水質鉛直分布を計測していないので、流量のみを表示している。残差流量は筑後川本川において全5地点で+21～66 m³/sであり、淡水が海に流出する収支となっている。一方、早津江川は－9 m³/sと逆流を示している。最大流量が1,000 m³/sを越えるため、流速の計測精度や横断分布などを考慮すると10 m³/s程度は誤差範囲と考えられるが、傾向としては本川とは逆の傾向を示す、もしくは順流量が非常に少ない可能性がある。

SSの1潮汐累積量は本川河口において順流であるが、その他の地点では逆流となっている。干潟では方向成分別に計算したところ、単位幅SS通過量は河口方向に遡上しており、仮に5 km程度の幅で同様の遡上傾向が生じていたとすると、逆流量は約 5×10^6 kgとなる。SSはデータ間隔が流量よりも長いため(1.5時間)、誤差も拡大しやすいが、基本的な変動パターンは捉えているため、移動方向が逆になることは無いと考えられる。

これらの計算結果は、SSが早津江川を遡上している可



図－7 感潮河道の水およびSSの移動量（9月24日，6.5km）

能性を示唆している。干潟で生成されたSSは上げ潮で筑後川本川及び早津江川に入るが、筑後川では正味量が順流となっており感潮河道へのSS運搬が生じない。早津江川では正味流量が逆流かつ極めて少ないので、SSも逆流が卓越している可能性が高く、これが6.5 kmよりも上流でのSS逆流量をまかなっていると推測される。図－2の河床材料分布によれば、干潟－早津江川－筑後川の6.5 kmより上流と繋げてみるとシルト・粘土分布の連続性が良いことも、SS遡上の主ルートが早津江川であるとの仮説を支持している。

5. まとめ

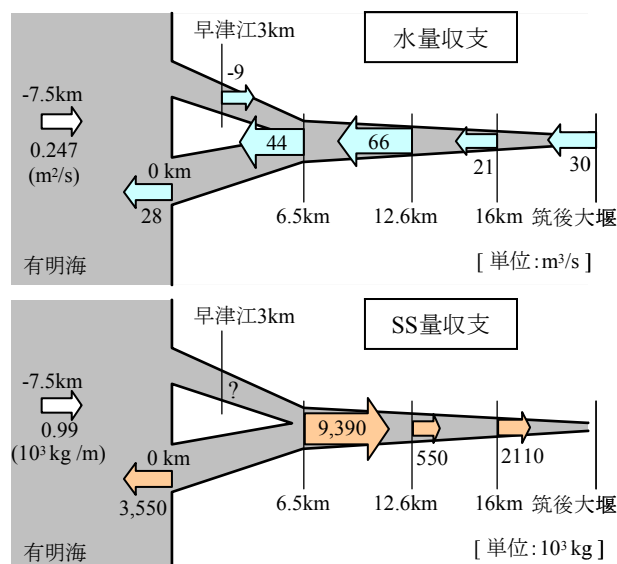
本研究では河口域における高濁度水塊の発生・輸送過程を明らかにすることを目的として、筑後川感潮河道および河口干潟において一潮汐間の流速、塩分、SSの鉛直分布に関する広域観測を実施した。観測日は、潮汐の日潮不等がほとんど無く、平均干潮位が高く、河川流量が低水流量を下回る条件下であった。

SS濃度は塩分と負の相関があり、塩水フロント（0.5 psu）において最大値を示した。河口付近（0～6.5 km）ではSS濃度と底面剪断応力の間に相関が無かったが、内陸部（12.6～16 km）では相関が見られ、河床材料も内陸部でシルト・粘土質であった。

水とSSのフラックスを計算し、筑後川本川では水は順流、SSは河口を除いて逆流との結果を得た。早津江川では水は計算誤差程度の逆流を示し、SSは未計測のため不明である。干潟では水もSSも逆流が卓越していた。

以上の結果から、SSは干潟域で発生して主に早津江川を経路として内陸側に遡上し、塩水遡上の上流端で沈殿していると推測される。感潮河道の10～16 km付近で2,000 mg/lを越える高濃度状態が常に発生しているのは、干潟域からの移流だけではなく、その場でSSが沈殿と巻き上がりを繰り返していることを示している。

本研究は一潮汐のみの結果であること、干潟域の計測



図－8 筑後川河口域の水およびSSの收支（9月24日）

点が1点である、早津江川のSSフラックスが不明、など条件が限定されているため、今後はこれらの問題点を補って現象の定量的な解明を進める予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、現地調査の企画は第一著者が主体的に行ったが、調査業務は筑後川河川事務所が実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 横山勝英, 宇野誠高: 河川感潮域における高濁度水塊の挙動－強混合河川の場合－, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.631-635, 2001.
- 2) 速水祐一, 前田和範, 大串浩一郎: 有明海における透明度の経年変動について, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp.117, 2007.
- 3) 八木宏, 井瀬肇, 石田大暁, 瀧岡和夫, 中山巖, 小谷正幸: 冬季有明海湾奥部浅海域における底層懸濁態物質の空間構造と輸送特性, 海岸工学論文集52巻, pp.941-945, 2005.
- 4) 満田雅男: 有明海湾奥部の浮泥と干潟の消長について, 水産庁筑後川調査報告, 1968.
- 5) 代田昭彦: 有明海の栄養塩類とニゴリの特性, 月刊海洋科学, Vol.12, No.2, pp.127-137, 1980.
- 6) 鈴木伴征, Arthur SIMANJUNTAK, 石川忠晴, Jorg IMBERGER, 横山勝英: 利根川河口堰下流部における潮汐流動に伴う微細粒子の運動, 水工学論文集, 第48巻, pp.775-780, 2004.
- 7) 宇野誠高, 横山勝英, 森下和志, 高島創太郎, 大角武志: 熊本県白川河口域における土砂動態, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.561-565, 2002.
- 8) 横山勝英, 梅田信, 和田昌行: 六角川における音響式SS測定装置の実用化試験, 河川技術論文集, 第11巻, pp.321-326, 2005.
- 9) E.-J. Houwing: Determination of the Critical Erosion Threshold of Cohesive Sediments on Intertidal Mudflats Along the Dutch Wadden Sea Coast, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 49, pp.545-555, 1999.

(2007. 9. 30受付)