

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——

横山 勝英*・宇野 誠高**

1. はじめに

沖積平野を貫流し長い感潮区間を有する河川の河口域は、微細な懸濁土砂が堆積しやすく浅い地形と栄養塩に富んだ底質を形成する。そのため生態系にとって重要な環境となっているが、一方でこれまで河川管理者が取り扱ってきた「河道」としての観点からすれば、洪水疎通能力確保や航路維持のために浚渫による断面拡大が必要な場合がある。したがって、環境に配慮した管理を実施するためには、河川感潮域における地形及び底質の形成機構を明らかにする必要がある。

地形及び底質の形成には、洪水時の土砂供給と平常時の潮汐による底質及び懸濁土砂の移動が関わっていると考えられるが、本研究では後者を取り扱う。これまでの研究によれば、河川感潮域では塩水楔の先端付近に高濁度水塊 (Turbidity Maximum) が発生することが知られており、例えば Wolanski ら (1995) はアマゾン川、フライ川 (パプアニューギニア) では通常の土砂濃度がそれぞれ 66 mg/l, 400 mg/l であるのに対して高濁度水塊の発生時には 2000 mg/l, 3000 mg/l に達すると報告している。

高濁度水塊の挙動は、塩淡水混合による懸濁土砂のフロク化と沈降速度の増大、鉛直循環流によるフロクの塩水楔先端への集積、非対称な潮流流による上流への輸送、という説明が一般的である (例えば、Wolanski ら, 1995; 西条ら, 1996)。しかし、河川感潮域での現地観測は技術的 (採水分析による多点計測は時空間精度に限界がある)、現象的 (移動速度が速い)、社会的 (漁業や船舶航行の邪魔になる) な理由によりかなり困難で、上記の説明を定量的に裏付ける精緻なデータは少ない。

本研究では、河川感潮域における平常時の土砂動態を把握することを目的として、強混合河川である白川 (熊本) と多摩川 (東京) の河口部で数ヶ月にわたって流れと濁度・塩分の現地観測を実施し、高濁度水塊の挙動特性について考察した。

2. 現地観測

(1) 観測対象地

観測は白川 (図-1) と多摩川 (図-2) の感潮域で実施した。白川と多摩川の感潮区間はそれぞれ 4 km と 13 km であり、いずれも強混合状態で塩水が進退している。

2つのフィールドの特徴的な差異は、白川の河道ならびに河口干潟は現在もほぼ自然の状態であるのに対して、多摩川は河口干潟が全て埋め立てられて京浜工業地帯や羽田空港に姿を変えていることである。

また、河床縦断と潮位との関係は、白川では潮位差が 4 m 程度と大きく、最干潮時の河口域は滞筋で水深が 50 cm 程度になり、滞筋以外は干出する。しかし多摩川では、平均水深で 1 m、最深では 4 m 程度あり、河口 (0 km) の沖合も (図示していないが) 浚渫されて深くなっている。

(2) 観測内容

高濁度水塊の観測内容は、a) 縦断移動状況を把握するための長期モニタリング観測、b) 定点での水質鉛直分布測定、c) 懸濁粒子の物性分析、である。

a) モニタリング観測では、白川の沖合 2.5 km と河道 0 km (河口)、河道 3 km、多摩川の河道 2 km と 5.5 km のいずれも滞筋に観測点を設置した。観測項目は流速と濁度・塩分・水温であり、自記式の超音波流速計 (RDI 製 1.2 MHz, NORTEK 製 1.5 MHz) を河床に設置し、また自記式濁度計、塩分水温計 (アレック電子製) を杭などの構造物やロープ・フロートに係留した。

計測は 2000 年 12 月から開始し、10 分間隔でモニタリングを実施している。超音波流速計は層厚 0.2~0.4 m で 1~2 分間の平均流速を計測した。多摩川 2 km 地点は濁度計を設置できなかったため、超音波流速計 (NORTEK) の音響強度から濁度を推定した (横山ら, 2001)。

b) 水質の鉛直分布測定は多摩川 2 km 地点で実施した。観測項目は濁度・塩分・水温の鉛直分布であり、多項目水質計 (アレック電子製) により鉛直間隔 10 cm、時間間隔 15 分で連続的に計測した。実施日は 2001 年 1 月 8 日と 2 月 22 日 (いずれも大潮) であり、前者は 28 時間連続で、後者は 8 時間連続で計測した。

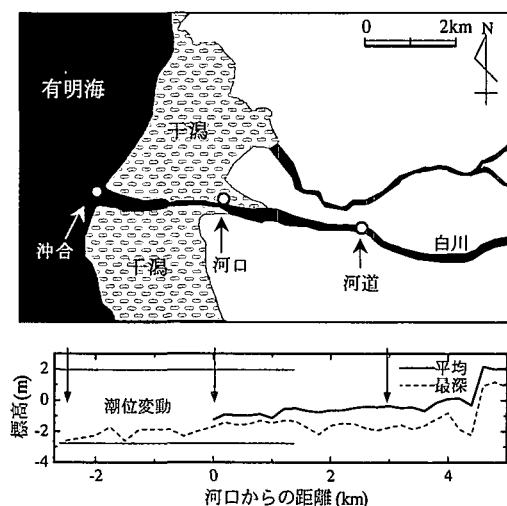


図-1 白川河口平面図及び縦断面図と調査地点

c) 懸濁粒子の物性分析は、白川ではモニタリング機器の点検時に、多摩川では鉛直分布測定時に、高濁度水塊から採水してSSと粒度分布を分析した。なお、濁度を土砂濃度に換算するために河川ごとにSSと濁度の相関を調べ、白川は $SS=1.41 \times \text{濁度}$ 、多摩川は $SS=1.11 \times \text{濁度}$ を得た。以後は濁度をSS換算した結果を示す。

また多摩川の鉛直分布測定時には、容器式採水器で濁水を採取し、30分～1時間静置して沈殿物をシャーレに取り、デジタル顕微鏡(キーエンス製)により倍率175倍で粒子の写真撮影を行った。

3. 半月周期の土砂動態特性

図-3, 4に白川と多摩川の約2週間の観測結果を示す。白川の図は風速、水位、塩分、SS(河床より0.25 m)を、多摩川の図は水位、塩分、SS(河床より1.2 m)を示している。SSは沖合から河道内部の順に並んでいる。なお、2000年12月から2001年4月までの期間では両河川とも上流流量は平水状態であり、潮汐並びにSSの変動は以下に示す半月周期のパターンを繰り返していた。

白川では沖合と河口のSS発生パターンは同じ傾向を示していたのに対し、河道は異なる傾向を示していた。沖合と河口のSSは、潮位差の大きい大潮から中潮で相対的に高くなり、潮位差の小さい小潮では低くなった。また、強い風が半日程度継続して吹いた時にSSが発生する傾向がみられた。このことより沖合、河口でのSSの発生は潮流や波浪などによる底質の巻き上がりが考えられる。

一方、河道では大潮から中潮期に限ってSSの上昇が認められたため、塩水遡上によって沖合及び河口で発生した濁水が輸送されていると推測される。

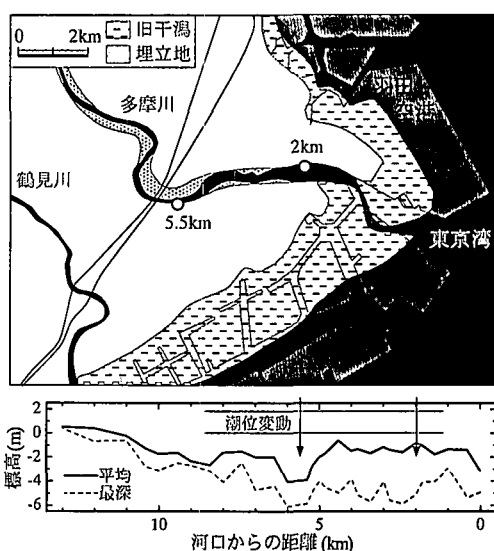


図-2 多摩川河口平面図及び縦断面図と調査地点

多摩川の河道2 kmでは潮位変動に応じてSSが上昇し、大潮から中潮にかけて相対的に濃度が高くなった。5.5 kmでは大潮から中潮の期間にわずかにSSが上昇した。SSの挙動と風速の間には関係は見られず、白川の河道と同様に塩水遡上による濁水輸送現象と推測される。

そこで次にSSの上昇が顕著な大潮時に着目して、SSの発生、移動の様子をより詳細に検討する。

4. 大潮～中潮期の土砂動態特性

(1) 白川河口及び沖合でのSS発生

図-5は大潮時の38時間のデータを抽出したものである。上段が河口水位と熊本港予想潮位、その下が沖合、河口、河道の3地点の主流方向流速と濁度・塩分の時系列である。流速は淡水流出方向を正に取っているため、引き潮が順流として表示される。河口は干潮時に海面よりも河床が高くなり河口水位の最低値がほぼ一定になるため、日潮不等は熊本港予想潮位によって示している。

SSの発生源と思われる沖合と河口でのSS変化サイクルは次の通りである。満潮時にはSSは低いが、引き潮で上昇し、干潮になると徐々に低下し、満ち潮で再び上昇して、その後すぐに消滅した。また、沖合、河口のSSピーク発生時間の対応をみると、引き潮時には河口から沖合へと約2時間で推移し、満ち潮時には逆に沖合から河口へと約1時間半で推移していた。この時の流速と塩分との対応をみると、流速の絶対値と塩分の変化率が大きいときにSSのピークが発生していることがわかる。

これらより沖合と河口でのSSは、潮汐作用に伴う塩水フロントの移動によって底泥が巻き上げられて発生

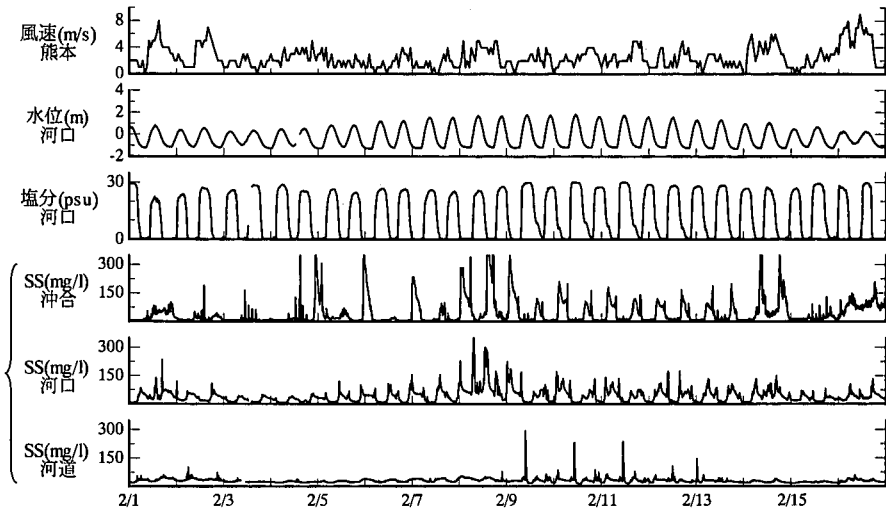


図-3 白川における半月の風速、水位、SS 時系列（沖合、河口、河道地点）

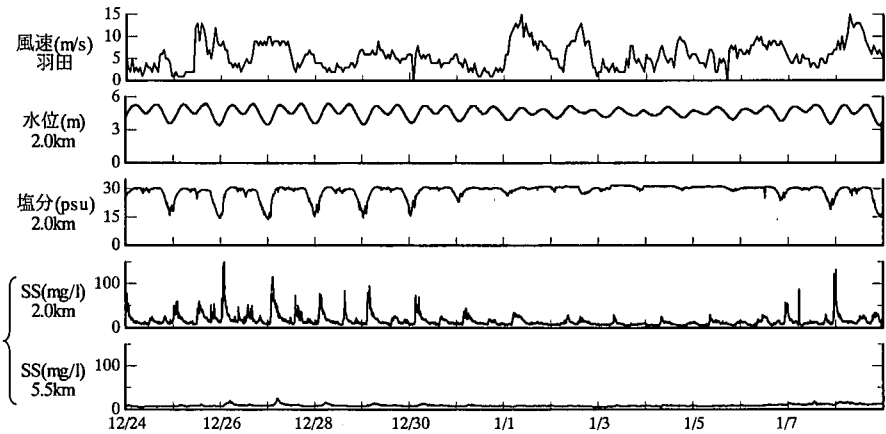


図-4 多摩川における半月の風速、水位、SS 時系列（河道 2 km, 5.5 km 地点）

し、塩水フロントとともに移動していると考えられる。

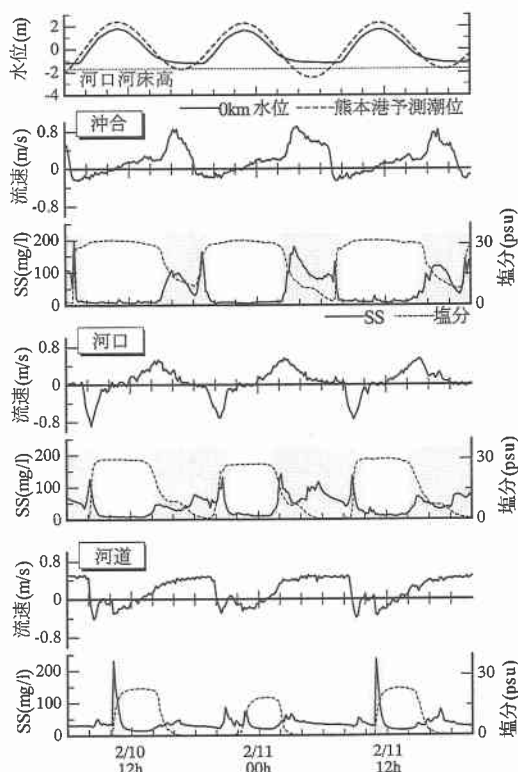
そこで SS の挙動と流速の関係について、風の強弱で分けて整理した（図-6）。風速が 2 m/s 以下の場合には SS と流速の関係は左右対称であり、順流（引き潮）及び逆流（上げ潮）流速の増大によって SS 濃度が増加することが見て取れる。一方、風速が 2 m/s を越える場合は流速との相関は見られない。ただし、流速に対する濁度の下限値は順流の方が高い傾向を示し、流速の最大値は逆流で生じている。観測期間の冬季風は沖から岸に吹き寄せる方向が卓越しているため、引き潮と強風が重なった場合は流速は低下するものの波浪や擾乱の影響によって SS が発生しやすくなるものと推測される。

なお、東京湾盤干潟（内山ら、2000）や有明海諫早湾（近藤ら、1996）での研究によれば、潮の満ち引きに伴って底面剪断応力が大きくなる際に底質の巻き上がり

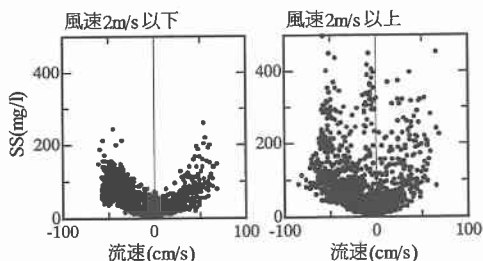
が発生すると報告されている。本研究では超音波流速計による時空間平均流（時間 120 秒、層厚 0.2 m の平均）しか得られていないため、底面剪断応力を精度良く算出することが出来なかったが、白川河口域でも同じような機構で SS が発生している可能性がある。

（2）白川河道における SS の移動

白川河道（3 km）の SS 時系列図は先に図-5 に示したとおりである。河道での SS 上昇は、日潮不等の潮位差の大きい潮の時に上げ潮で見られた。河道の SS ピークは河口の約 2 時間後に生じており、塩分の上昇についても同様であった。平均的な逆流流速は 0.4 m/s であったため、河口から河道への濁水到達時間を計算したところ約 2 時間となり、ピーク推移時間とほぼ一致していた。以上より、河道での SS の上昇は沖合、河口で発生した濁水が塩水とともに遡上してきたものと考えられる。



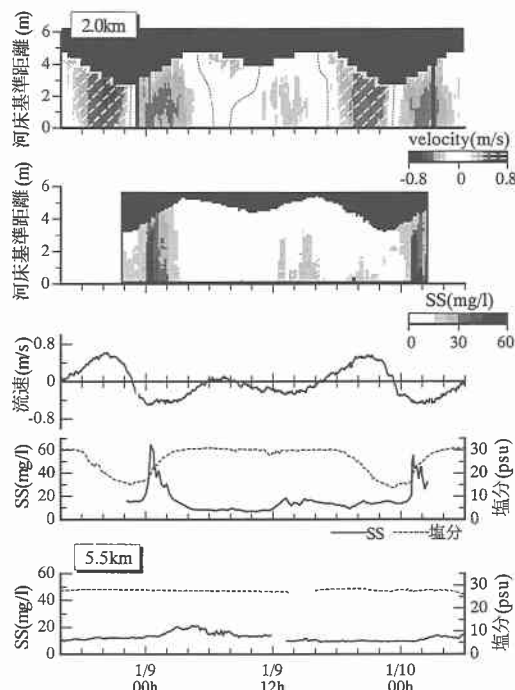
図—5 白川における大潮時の水位、流速、SS、塩分時系列(河床より0.25~0.5 m)



図—6 河口の流速とSSの関係(風速2 mで場合分け)

ただし、SSの上昇が大潮の上げ潮で必ず起きるわけではなく、潮位差の大きい潮で生ずる原因については次のように考えられる。潮位差の大きい潮の時は、満ち潮時の塩分とSSは急激に上昇し、またSSが最大となるとき塩分は5~10 psuであった。つまり、潮位差の大きい潮では塩水フロントが強い境界を持っており、濁水は塩水フロントの前面部分の混合領域に位置しているため、塩水フロントと共に河道まで遡上してくると推測される。

また、SSの濃度が河口よりも河道の方が大きくなっているが、これも強い境界の存在によるものと考えられる。河川水から供給される懸濁土砂は塩淡水混合によってフ



図—7 多摩川における大潮時の水位、流速、SS、塩分時系列(河床より1.2 m)

ロックを形成して沈降速度が増大すると言われているが、この説に基づけば、土砂ブロックは塩水フロントの前面に集積して高濃度水塊が成長するであろう。

一方、潮位差の小さい潮の時は、満ち潮時の塩分は緩やかに上昇し、SSは塩分よりも遅れて上昇する。従って潮位差の小さい潮ではフロントが混合しており、かつSSはフロント内部に存在するため、河道内への移動に伴い拡散して薄くなると推測される。

(3) 多摩川河道におけるSSの移動

図—7は多摩川河道2 kmにおいて水質鉛直分布を大潮時に38時間連続で計測した結果である。上段より流速・SSの鉛直分布時系列、中段が河床から1.2 mの流速・SS・塩分の時系列、下段は5.5 kmのSS・塩分時系列である。

流速とSSの鉛直分布は表面を除いてほぼ様になっており、強混合状態で塩水が進退していることが分かる。SSの上昇は、上げ潮によって塩分が立ち上がり、かつ逆流流速が最大に到達する直前に現れる。その後、最大流速は2時間程度継続するが、SSは尖塔状のピークを示してすぐに落ち込んでしまう。

また、順流時には流速が逆流流速と同等かそれ以上であるにもかかわらずSSの発生は見られない。つまり、SSと流速の絶対値とは対応しておらず、白川の河道と似た

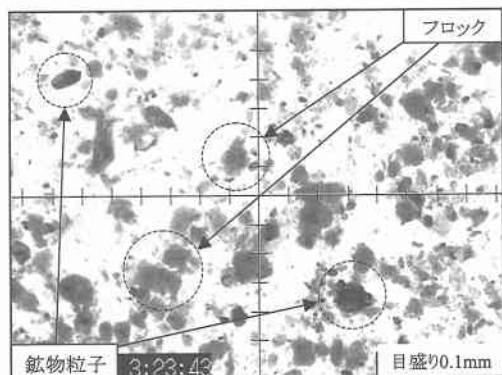


写真-1 濁質粒子の顕微鏡写真（多摩川の河道 2 km）

ような状況にあると考えられる。

そこで、ブロックの存在を確認するために高濁度水塊から採水して粒子の顕微鏡観察を行った（写真-1）。輪郭の不鮮明な団子状のものはブロックであり、輪郭の鮮明なものは鉱物粒子である。両者の正確な存在比率は計測できないが、高濁度水塊中にはブロックと単体の鉱物粒子が共に存在していることが確認された。ブロックは大きいものでは 0.1 mm 以上あったが、団粒構造を超音波振動により壊してから粒子単体の粒度分布を計測したところ、 $D_{50}=0.011$ mm, $D_{90}=0.038$ mm が得られ、ブロックはかなり大きく成長していた。これらの事実は、高濁度水塊が底質の巻き上げと粒子のブロック化という 2 つの機構で発生・発達していることを裏付けている。

また、上流部（5.5 km）では、2 km 地点から 2.5 時間程度遅れて SS の上昇が観測されたが、濃度は 2 km よりも低くなっており、塩水はほとんど混合していた。

以上より高濁度水塊の挙動を推測すると、上げ潮によって塩水遡上（逆流）流速が大きくなる際に、河口ないし沖合で高濁度水塊が発生し、塩水フロントの前面に乗ってブロックを成長させながら河道を遡上し、上流に行くにつれ粒子が拡散もしくは沈降して濃度が低くなるものと考えられた。

多摩川では河口や沖合で観測を行っていないので、高濁度水塊の発生については分からない部分が多いが、白川の河口のように流れや波浪の影響で底質が巻き上げられて SS が生じている可能性がある。

5. ま と め

強混合状態にある多摩川と白川の感潮域において、流速・濁度・塩分の数ヶ月にわたるモニタリングと懸濁粒子の物性分析を実施し、高濁度水塊の挙動の全体像を明

らかにした。

河口に干潟のある白川では、潮の満ち引きで流速が増大する時と強風の時に SS 濃度の上昇が見られ、潮汐流や波浪の影響で SS が発生していると推測された。

河道内では白川及び多摩川の両河川で SS が塩水フロントの前面に乗って移動し、移動に伴って濃度が高くなる現象が見られた。これは、上流から供給された浮遊土砂が塩淡水境界面でブロックを形成し、沈降速度が増大することで塩水フロントの前面に SS が集積して、その結果濃度が上昇したものと考えられる。

実際、高濁度水塊にはブロックと鉱物粒子の両方が浮遊していることが確認され、白川河口での観測結果と考え合わせると、高濁度水塊は浮遊粒子のブロック化と生産場所における底質材料の巻き上げの 2 つの機構によって起きている可能性が高いことが示された。

また、SS が塩水フロントの内部に入った場合は、移動に伴って拡散して濃度が低下すると推測された。

ただし、高濁度水塊の発生機構についてはさらなる調査検討が必要である。多摩川と白川の河口地形はかなり異なり、多摩川はかつて存在した干潟がほとんど消滅し、最大水深も 4m 程度と深い。そのため、白川河口と同じメカニズムが多摩川に存在するかどうかは不明であり、今後この点について詳細な調査を実施する予定である。

謝辞：本研究の実施にあたり、産業技術総合研究所海洋動態モニタリング RG の長尾氏、国土技術政策総合研究所海洋環境研究室長の古川氏には貴重なご助言をいただいた。また現地観測では、釣り宿かみや（多摩川観測サイトの提供）、アレック電子株式会社（多項目水質計の貸与）、株式会社キーエンス（デジタル顕微鏡の貸与）の各位にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

なお、多摩川での機器設置は（株）日本ミクニヤに、白川の観測全般は国土環境（株）に実施していただいた。

参 考 文 献

- 内山雄介・加藤一正・栗山善昭・古川恵太（2000）：東京湾盤州干潟の漂砂特性について，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 521-525.
- 近藤雅秋・戸原義男・平松和昭・四ヶ所四男美・森 健（1996）：潮流による底泥の巻き上げ特性に関する研究，農業土木学会論文集，No. 182，pp. 109-115.
- 西条八束・奥田節夫（1996）：河川感潮域，名古屋大学出版会，pp. 85-96.
- 横山勝英・藤田光一（2001）：多摩川感潮域の土砂動態に関する研究，水工学論文集，第 45 巻，pp. 937-942.
- Wolanski, E. and Gibbs, R. J. (1995): Flocculation of suspended sediment in the FLY RIVER estuary, PAPUA NEW GUINEA, J. Coastal Research, Vol. 11, No.3, pp. 754-762.