

白川感潮域における高濁度塩水フロントの動態

BEHAVIOR OF THE TURBIDITY MAXIMUM RELATING TO THE DENSITY CURRENT IN THE TIDAL RIVER OF THE SHIRA RIVER, JAPAN

山本浩一¹・横山勝英²・高島創太郎³・大角武志⁴・阿部澄恵⁵・進藤一俊⁶
Koichi YAMAMOTO, Katushide YOKOYAMA, Sotaro TAMASIMA, Takeshi OHSUMI,
Sumie ABE and Kazutoshi SHINDO

¹正会員 博(工) 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト 講師(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²正会員 工博 首都大学東京 都市環境学部 講師(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 工修 国土環境株式会社九州支店(〒812-0055 福岡県福岡市東区東浜1-5-12)

⁴国土環境株式会社九州支店(〒812-0055 福岡県福岡市東区東浜1-5-12)

⁵正会員 国土環境株式会社環境計画グループ(〒154-8585 東京都世田谷区駒沢3-15-1)

⁶住友海洋開発株式会社(〒104-0053 東京都中央区晴海1丁目8番8号)

The Shira River, one of the rivers that flow into the Ariake Sea, has well mixed estuary. In the estuary of the river, turbidity maximum is observed. Turbidity meter, conductivity meter, Acoustic Doppler Profiler and head rotating side scan sonar (Simrad Mesotech MS-1000) were installed in the River. Turbidity, water temperature, conductivity and vertical distribution of the horizontal current were measured in every 10 minutes. Moreover, longitudinal vertical 2-D acoustic image was observed continuously using Sonar. Water samples were collected intensively when the density current passed. The acoustic imagery of the front of the density current was successfully obtained. The front consists of saline water and high concentration of SS. From the acoustic imagery, it was found that the form of the front of the density current was inflated and Kelvin-Helmholtz instability was observed at the boundary layer of the density current

Key Words : Tidal river, sediment, density current, turbidity maximum, acoustic imagery

1. はじめに

有明海に流入する河川の河口部では最大6 mに達する大きな潮位差によって塩水が強混合で遡上する。また、高濃度の懸濁物質が含まれる水塊(高濁度水塊)が形成され潮汐により流動して感潮河道にシルト・粘土の堆積を生じている。有明海に流入する最大の河川である筑後川では感潮河道の広域で高濁度水塊が観測され¹⁾²⁾、同じく有明海に流入する白川でも感潮河道における高濁度水塊の発生が観測されている³⁾。高濁度水塊は上げ潮時の流れや水面勾配により生じると考えられるが、その詳細な形成機構については明らかではない。本研究では河川感潮域でみられる高濁度水塊の形成機構を明らかにすることを目的とし、白川を対象に観測を行った。

2. 研究方法

(1) 調査対象水域

研究対象河川である白川は、熊本県の阿蘇カルデラ

に源を発する流域面積480 km²、流路延長74 kmの一級河川である(図-1)。河口から4.4 km地点(4.4 KP)には井樋山堰があり、感潮区間はこれより下流となる。

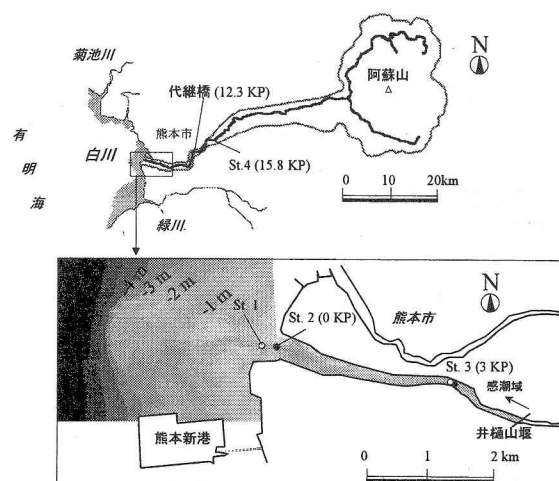


図-1 調査対象水域(上: 白川集水域, 下: 白川感潮域および海域, 海域のコンターは海底の標高を表す。)

有明海に面する白川河口域は潮位差が最大4 m程度 (TP: -2 m ~ 2 m) であるため、上げ潮時には海水が強混合状態で感潮河道を遡上する。干潮時には沖合 2.5 km程度まで幅4 km程度の砂質～砂泥質の干潟が出現する。調査地点は感潮域に3地点 (St. 1 ~ St. 3) 設定した。

(2) 調査方法

a) 高濁度水塊の物理特性調査

2004年2月23日～2004年2月24日の期間、白川St.3 (3KP地点) に、現場設置型粒度分析計 (Sequoia Scientific Liss-100) を設置してリアルタイムの体積粒径濃度を把握し、ヘッド回転型サイドスキャンソナー (Simrad Mesotech MS-1000) を同地点の底上150cmの位置に固定して河川下流方向の鉛直縦断面の反射音響画像を得た。採水は河床直上0.5mの位置に設置したポンプ式ポータブル採水器 (ISCO) およびバンドン採水機を用いて採水し、懸濁物質はシャーレに採取してデジタル顕微鏡 (KEYENCE VHX-100) を用いて観察した。ポータブル採水器で検鏡用のサンプルを採取する際は採水用チューブとポンプの間にビニールチューブを介して採取し、ビニールチューブに採取されたサンプルを検鏡した。2004年6月3日～4日には3KP地点の底上50cmに精密超音波流速計 (Nortek Vector 6MHz) を設置し、1分おきに10秒間16Hzで流速を計測し、10秒間の平均流速に対して乱流流速を求め乱流エネルギー (Turbulent Kinetic Energy, TKE) を求めた。

b) 高濁度水塊の化学特性調査

2003年2月17日～2月18日までの2潮汐の間 (24時間)、多項目水質計を用いて河口 (St.2) および河道 (St.3) において20分に一回以上水質計による水温、塩分、濁度、DO、pHの鉛直プロファイルを取得し、採水を行った。同時に河床に埋設されたADCP (Nortek Aquadopp 2MHz) によって、5分間隔、層厚0.2mの鉛直流速分布を取得した。観測終了時に0KP, 1KP, 2KP, 3KP地点で表層底泥を採取した。水、底質についてはSS、懸濁態窒素 (PN)、懸濁態リン (PP)、懸濁態反応リン (PRP)、懸濁態有機炭素 (POC)、懸濁態酸可溶性鉄 (PFe)、クロロフィル (Chl-a) を分析したほか、ブロック破碎後の粒度分布を島津SALD-3000により分析した。

(3) 懸濁物質の凝集に関する解析

懸濁物質の凝集には、流体の運動に関連して下記の3種類のプロセス1) 分子拡散運動 (ブラウン運動)、2) 流速勾配による粒子の衝突、3) 乱流拡散によるブロックの破壊が主に関わっているとされている⁴⁾。河川のような開水路は乱流場であるから、上記1) に対して2) や3) が卓越すると考えられる。

2) の指標として本研究では (1) 式で与えられる絶対流速勾配 G を用いた。

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2} \quad (1)$$

ただし、河川横断方向の流速が得られていないので鉛直2次元のデータを解析した。各層の G から最大値、平均値、最小値を算出して解析に用いた。

次に3) にかかわる要素として、底面からの高さ50cmにおいて16Hzで10秒間計測された流速の平均値に対して乱流流速を求め乱流エネルギー (Turbulent Kinetic Energy, TKE) を求めた。TKE ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) は (2) 式で定義される。

$$TKE = \frac{(\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2)}{2} \quad (2)$$

ここで u', v', w' : x, y, z方向の乱流流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

粒径 a (m) のブロックの体積濃度を $V_F(a)$ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)、粒子単体の密度を ρ_s ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、ブロックの有効密度を $\rho_e(a)$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、水の密度を ρ_w ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) とすると、粒径 a のブロックの乾燥重量濃度 $W_F(a)$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) は

$$W_F(a) = \frac{\rho_e(a) \rho_s}{\rho_s - \rho_w} V_F(a) \quad (3)$$

で表される。また、粒径 a のブロックの T ($^{\circ}\text{C}$) における沈降速度を $w(T, a)$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) とおき、沈降速度はブロックを正8面体近似し、沈降速度はおおむねストークス式に従う⁵⁾と仮定すると、

$$w(T, a) = \frac{\rho_e(a)}{25.5 \mu(T)} g a^2 \quad (4)$$

で表される。ただし $\mu(T)$ は水温 T ($^{\circ}\text{C}$) における水の粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) である。よって、SS濃度を SS ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) としたときの沈降速度の重量平均 w_{mean} ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) は、

$$w_{\text{Mean}} = \frac{\int W_F(a) w(T, a) da}{SS} \quad (5)$$

であらわされる。よって沈降のみの現象を考えたときのブロックの重量平均沈降フラックス

J_{Mean} ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) は

$$J_{\text{Mean}} = w_{\text{Mean}} \cdot SS \quad (6)$$

であらわされるから、結局

$$J_{\text{Mean}} = \int W_F(a) w(T, a) da \quad (7)$$

$$= \int \frac{\rho_e^2(a) \rho_s g a^2 V_F(a)}{25.5 \mu(T) \cdot (\rho_s - \rho_w)} da \quad (8)$$

となる。

3. 研究結果

(1) 白川河口域における高濁度水塊の遡上

2004年の観測結果を図-2に示す。0KP (St.2) で濁度が50mg/L以上のやや高い状態になってから約2時間後に3KP (St.3) で濁度が急激に上昇し、150mg/L以上となった。濁度の上昇の程度は河口を上回る高濁度であり、濁度が100mg/Lを上回った時間は15分間程度であった。10:48に高いSS濃度が記録されたが、詳細な計測した濁度、塩分、SS濃度のグラフを図-3に示す。

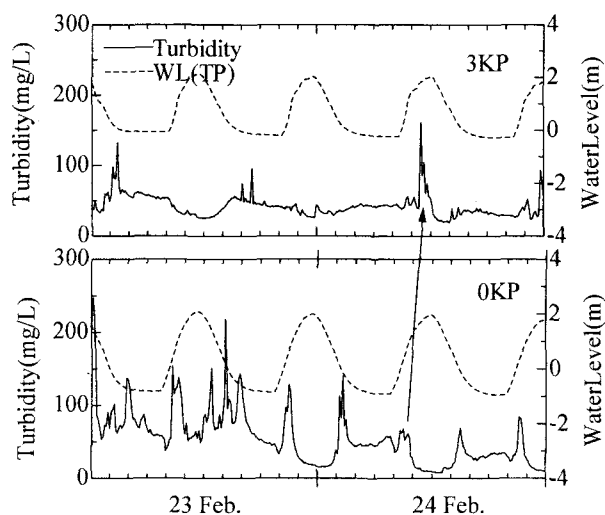


図-2 水位および濁度の連続計測結果 (2004年2月23日～24日, 白川)

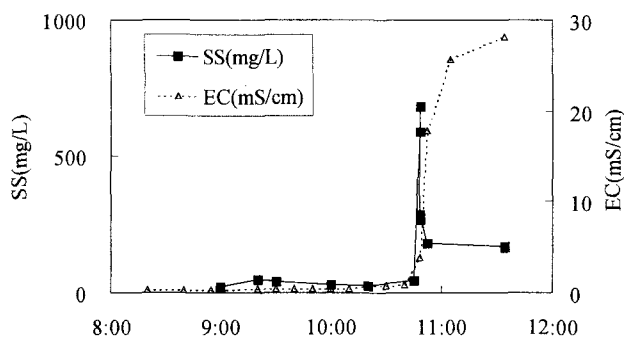


図-3 白川St.3におけるSS濃度・電気伝導度 (EC) の観測結果 (2004年2月24日)

ソナーによる音響探査の結果、その時刻にSt.3において底層を遡上する水塊が通過しているのが認められた (図-4)。図-4において灰色が濃い部分は超音波の散乱強度が強い水塊であることを示している。この水塊が通過する前後における水質の鉛直分布の観測結果を図-5に示す。10:48より後では、下層に塩水が進入していることがわかる。

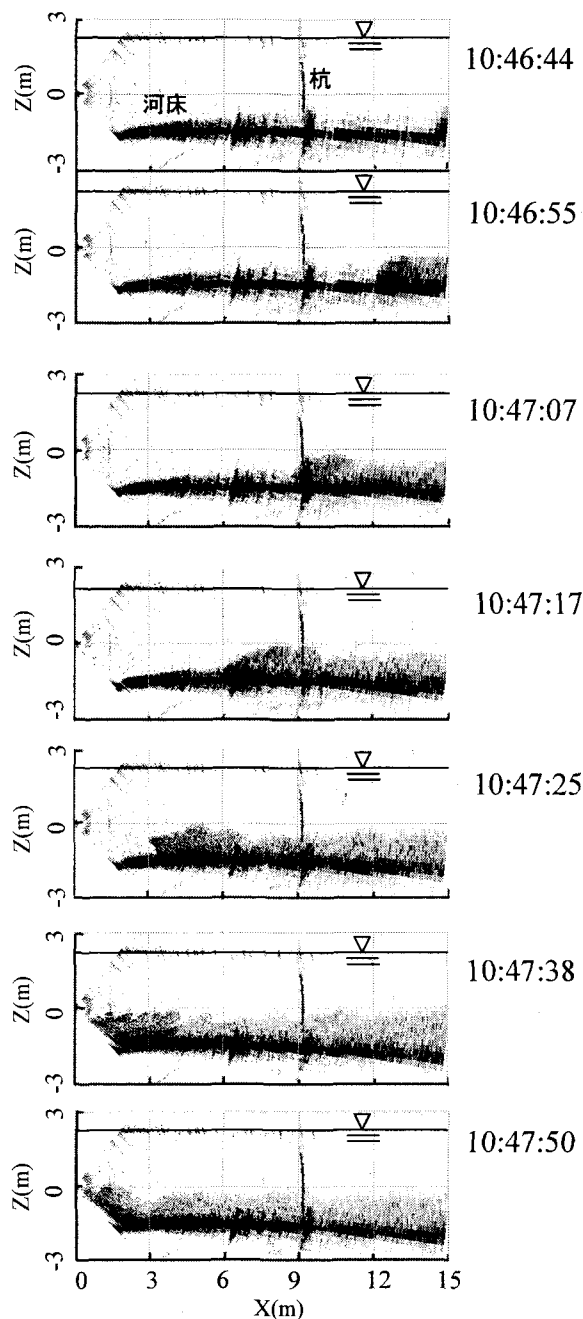


図-4 高濁度塩水フロントの連続スキャン結果, 白川3KP, 2004年2月24日10:46～10:48, x: ソナーヘッドから下流方向の距離, Z: ソナーヘッドを基準とした高さ

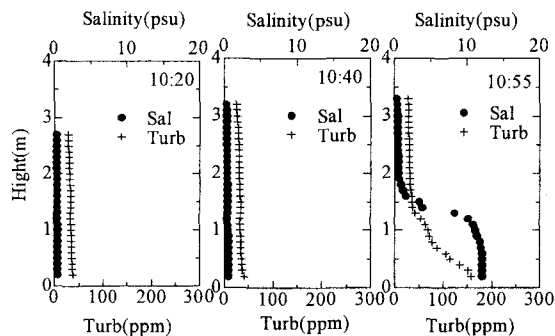


図-5 高濁度塩水フロント通過時の濁度 (Turb)・塩分 (Sal) の鉛直分布 (白川St.3, 2004年2月24日)

よってこの強音響散乱水塊は高濃度の懸濁物質を含んだ塩水塊であることがわかる。この塩水塊の先端部のSS濃度は $685 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、水温は 10.3°C 、塩分は 2.77 psu であり、塩水塊の密度を計算すると $1003.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ となった。一方、表層部の水温は 12.1°C 、塩分は 0.26 psu 、SS濃度は $22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ で密度は $999.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ であり、密度の異なる水塊であることが分かる。この塩水塊は速度 $0.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ で遡上しており、その形状は、開放交換流れ（Lock Exchange Flow）の実験で観察される重力流の先端形状に近かった（図-6）重力流の先端部が河床となす角度 θ は、非粘性流体の場合 60° となるが、今回確認された先端の角度 θ は 60° よりもやや小さかった。なお、図-6の時点（10:46:55）では音波が水塊先端を掃過するために必要な時間は0.47秒であるので、画像のゆがみはおおむね無視できると考えられる。

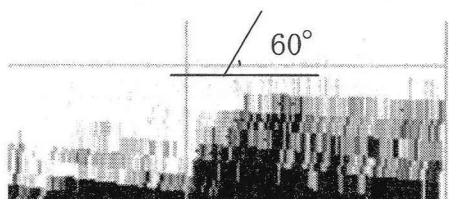


図-6 塩水フロント先端の拡大図（白川St.3, 2004年2月24日10:46:55, 図中グリッド: 3m）

Lock Exchange Flowにおける重力流の進行速度と比較するため、(9)式～(11)式からなるBenjaminが導いた関係式⁶⁾によって高濁度塩水フロントの進行速度を評価した。

$$\frac{U}{\sqrt{g'h}} = \sqrt{\frac{(1-n)(2-n)}{1+n}} \quad (9)$$

$$n = \frac{h}{H} \quad (10)$$

$$g' = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1} g \quad (11)$$

ここで U : 下層密度流の流速, H : 水深, g : 重力加速度, h : 密度流の厚み, ρ_1 : 軽い流体の密度, ρ_2 : 重い流体の密度

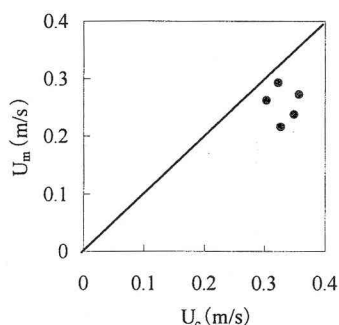


図-7 Benjaminの式による密度流の流速の計算結果 (U_c) と実際に観測された流速 (U_m), 白川St.3, 2004年2月24日

実測された速度と上記で計算された値を比較した（図-7）。実測値は計算値をやや下回るものの、ほぼ一致する結果が得られた。実測値が理論値よりも下回るのは矩形ではない横断面形状や底面の摩擦が原因であると考えられる。

(2)高濁度水塊中の懸濁物質と底質の化学組成

次に、高濁度水塊中の懸濁物質の組成について考察する。2003年2月の観測時における、底質と懸濁物質のSS濃度に対するPN濃度 (g/g), PP濃度 (g/g), PRP濃度 (g/g), POC濃度 (g/g), PFe濃度 (g/g), Chl-a濃度 (mg/g) および $1.0 \sim 54.8 \mu\text{m}$ にいたる7階級の粒径頻度 (%) を用い、主成分分析によって解析した（図-8, 図-9）。第二主成分までの累積寄与率は62.59%であった。第一主成分は細粒分の寄与を示しており、第二主成分は窒素やリン成分の含有量の寄与を示している。

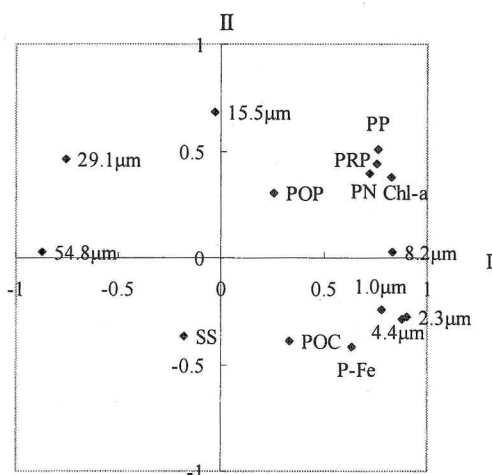


図-8 高濁度水塊中の懸濁物質の主成分負荷量分布（第1主成分（I）寄与率：47.85%，第2主成分（II）：14.75%）

感潮域上流部のSt.3（3KP）における高濁度水塊中の懸濁物質の主成分得点は河道2KPあるいは3KPにおいて採取された底質の主成分得点の近傍にプロットされ、0KPで採取された沈降物や表層泥からはプロットが離れていることから、高濁度水塊の懸濁物質そのものは測定点の直近の底質が混入している割合が高いことが示唆された。すなわち、高濁度塩水フロントを構成する濁質はその場で塩水の通過による強い乱れによって直接巻上げられたものであるといえる。しかし、塩水塊の海側では第1主成分が高く、海側の懸濁物質に近いことを示している（図-10）。これは常に塩水塊のフロントの速度 ($0.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) が後方の塩水塊の流速 ($0.25 \sim 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) を上回っているために縦断方向の懸濁物質の分布が生じているものと考えられる。

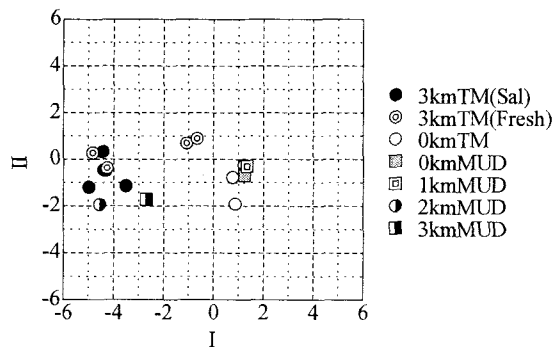


図-9 高濁度水塊中の懸濁物質と底質の主成分得点分布, x km TM(Sal): xkm地点における塩分を含んだ高濁度水塊中の懸濁物質, x km TM(fresh): xkm地点における淡水の高濁度水塊中の懸濁物質, xkm MUD: 河口からx km地点における表層底泥

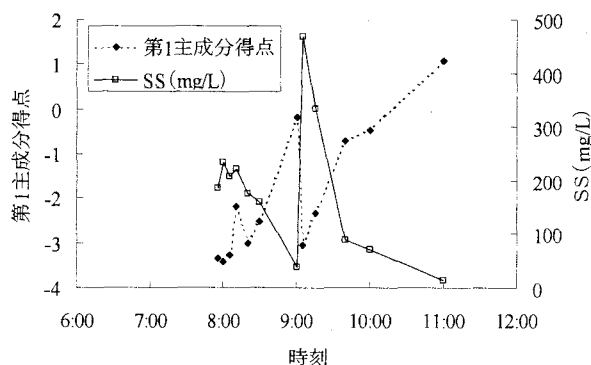


図-10 高濁度水塊中におけるSS濃度と懸濁物質の第1主成分得点の時系列変化 (St.3, 白川, 2003年2月18日)

(3) 高濁度水塊中における懸濁物質の凝集状態

高濁度水塊からバンドン採水機で採水し、現地において懸濁物質をデジタル顕微鏡で検鏡した結果、10%粒径、50%粒径、90%粒径はそれぞれ247 μm , 577 μm , 900 μm であった。後日超音波で破壊した後SALD-3000により分析した結果、10%粒径、50%粒径、90%粒径はそれぞれ2.3 μm , 15.5 μm , 73.7 μm であったので、もともとはシルト・粘土であるものが高濁度水塊内部では凝集・ブロック化して粒径を増していることがわかった。また、現場に設置したレーザー粒度分析装置Lisst-100によると同じ懸濁物質について10%粒径、50%粒径、90%粒径はそれぞれ81 μm , 276 μm , 426 μm であり、同様に凝集していることを示していた。ただしこの機械については500 μm 以上の測定が不可能であるので、検鏡結果とは異なる。いずれにしても高濁度水塊中の懸濁物質は凝集しており、非常に大きな粒径のブロックが存在している。

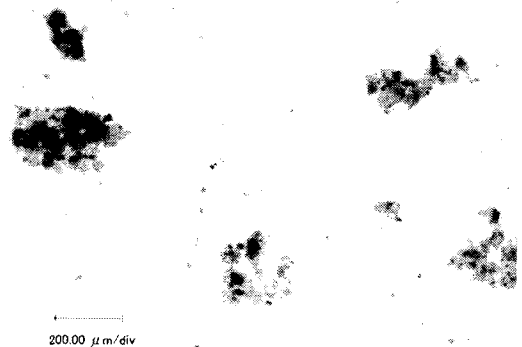


図-11 高濁度水塊中の懸濁物質 (白川St.3, 10:48 バンドン採水器によって底上50cmの水を採取)

(4) 白川感潮域におけるブロック形成の要因

次に、懸濁物質の凝集の要因について検討した。

図-12に塩分とLisst-100によって観測されたブロックの粒径の状況を示す。逆流（東方成分流速が正の状態）開始と同時に濁度が増加し、電気伝導度が0.5 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下の環境（淡水の環境）において粒子の粒径も次第に粗大になってゆく。なお、全期間で懸濁粒子の粒径は超音波破碎後200 μm 以下であり、懸濁物質を構成しているのはシルト・粘土であることを確認している。

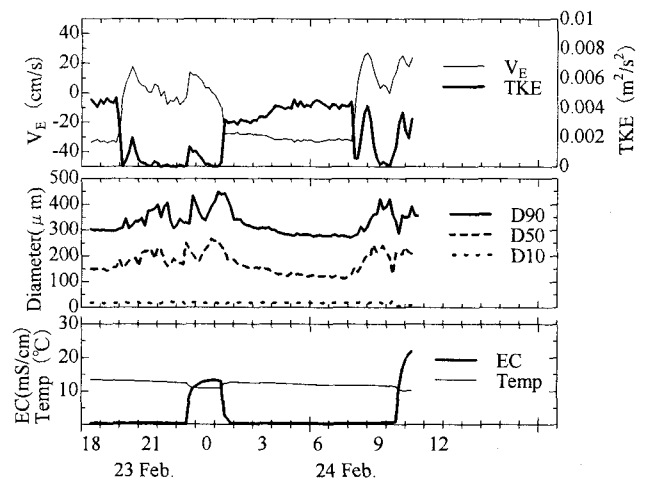


図-12 調査時における東方成分流速および乱流エネルギー (TKE), 懸濁物質の90%粒径 (D90)・50%粒径 (D50)・10%粒径 (D10) (中), 底面上50cmにおける水温 (Temp)・電気伝導度 (EC) (下), 2004年2月23日～24日, 白川St.3

河川感潮域では一般に塩水の作用によって懸濁物質が凝集し、ブロックを形成するといわれているが、白川では淡水の状況でもブロックを形成していることがわかる。これは懸濁物質が底質に由来するためであると説明できる。感潮域の底質は海水と接触履歴があり、微生物の活動が活発であるために塩分に関係なくブロック化していると考えられる。

懸濁物質の90%粒径を目的変数とし、水温、電気伝導度、TKEを説明変数として重回帰分析により析出した結果、電気伝導度とTKEについてそれぞれ偏相

関係数が0.411, -0.641となり、それぞれ1%有意にて90%粒径と相関があることが示された（表- 1）。

塩分はフロック粒径をさらに増加させる方向に、TKEはフロック粒径を減少させる方向にはたらいっている。潮汐の作用により感潮河道において流速が増大し乱流エネルギーが増加すると、フロックの粒径は減少することがわかる。なお、TKEは別途超音波流速計（Vector）による観測によって現地のTKEと主流向流速の関係を求め、ADCPによる層別の平均流速を用いて推定したものである。

表- 1 懸濁物質の凝集に関する重回帰分析結果（白川3KP, 2004年2月23日～24日, 目的変数：90%粒径）

説明変数	偏相関係数	単相関係数
水温	0.0805	-0.3262
塩分	0.3899	0.4992
TKE	-0.6914	-0.7030

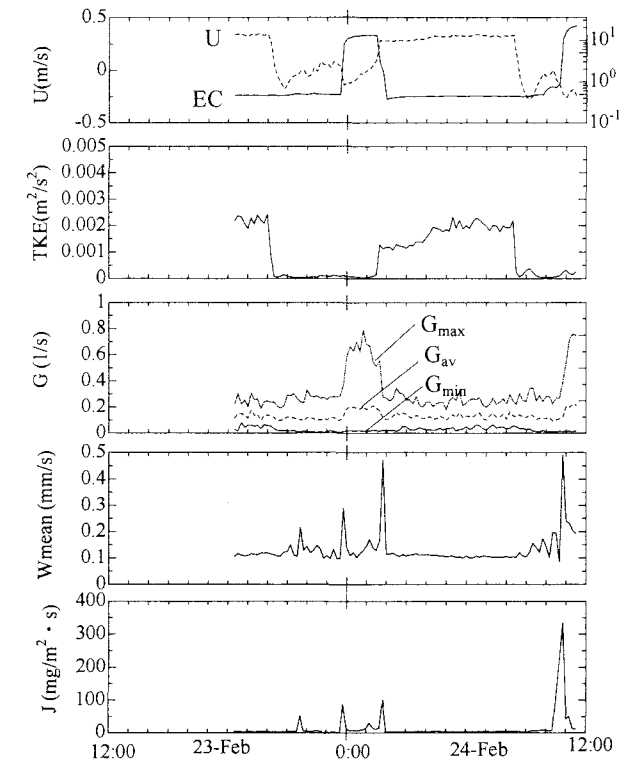


図- 13 底面から50cm地点の東方成分流速（U），電気伝導度（EC），乱流エネルギー（TKE），最大・平均・最小絶対流速勾配（ G_{max} , G_{av} , G_{min} ）， W_{mean} ，沈降のみを考慮した場合の懸濁物質の推定沈降フラックス（J），2004年2月23日～24日，白川St.3

懸濁物質が凝集すると沈降速度が大きくなって沈降フラックスが増加するが、St.3における流速、塩分、乱流エネルギー（水平流速からの推定値）、G値、重量平均沈降速度、懸濁物質の沈降フラックスを

図- 13に示す。24日8時頃から粒径を増したフロックの沈降速度は増大しているが、懸濁物質濃度が低いために沈降フラックスは小さくなっている。24日10時30分頃より塩分の増大が始まると、なお一層沈降速度は増大する。沈降フラックスが最も大きくなるのは塩水フロントの到達時であり、沈降フラックスは最大 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。濃度は高く最大 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ に達し、粒径も飛躍的に大きくなって粒径が $1000 \mu\text{m}$ に達するフロックも存在する。ただし塩水フロントの通過時には底面のフロックあるいは底泥が活発に巻き上がっているので正味の沈降フラックス評価のためには巻き上げ量の評価が必要である。

4. 結論

本研究は高濁度塩水フロント（高濁度水塊）の本質と実態を明らかにすることを目的として、白川河口域を対象に物理・化学的側面から集中的な観測を行った。本研究で得られた結論は次の通りである。

- ・白川で認められた高濁度塩水フロントは速度 $0.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ で遡上しており、その形状は、開放交換流れ（Lock Exchange Flow）の実験で観察される重力流の先端形状に近かった。
- ・平水時に感潮域を流動するフロックは塩水フロントの先端で形成しているのではなく、上げ潮の憩流時に凝集して底質表面に沈降・堆積したものである可能性が高い。
- ・高濁度水塊のSSの組成分析から、塩水フロントの先端部のSSは感潮域の底質の組成に近いが、塩水フロントの後方（海側）に含まれるSSは海域の底質の組成に近くなっている。
- ・凝集・沈降の過程で底面に堆積したフロックは塩水フロントの到来に伴って巻き上げられて塩水フロントの内部に取り込まれ感潮河道を遡上する。沈降フラックスは高濁度水塊内部で最も大きい。

今後は底面の懸濁物質の巻き上げ量についても解析を行ってゆく予定である。

参考文献

1)代田昭彦（1980）：有明海の栄養塩類とニゴリの特性，海洋科学12,2,pp127-137
2)横山勝英・河野史郎・山本浩一（2005）：筑後川河口域における高濁度水塊の挙動に関する現地観測，土木学会第60回年次学術講演会，CD-ROM
3)横山勝英，宇野誠高（2001）：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
4)土木学会編（2004）：環境工学公式モデル・数値集，pp.9-15
5) Tambo, N., Watanabe, Y. (1979): Physical characteristics of flocs I, The floc density function and alminium floc, Water Research, Vol. 13, pp.409-419.
6) Camp,T.R. (1953): Flocculation and flocculation basins, Proc. A.S.C.E., Vol.79, No. 283, pp. 1-18.