

## 第3章 河川感潮域における懸濁物質の凝集と高濁度水塊の遡上

### 3-1 はじめに

有明海に面する河口部では大きな潮位差により、塩水が強混合で遡上する。白川感潮域も例外ではなく、平水時においては潮汐に伴って大潮時では最大  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  に達する流量変動が起こる。これは年間 10 回程度起こる洪水に匹敵する。このような感潮域での流量変動および水理環境の変化に伴って感潮域では高濁度水塊 (Turbidity Maximum) が形成され、高濃度の懸濁物質が含まれる水塊が潮汐により流動する。筑後川では感潮河道の広域で非常に高濃度な SS 濃度が観測されている (横山ら, 2005)。白川においても、定点観測により高濁度水塊の通過が確認されている (横山ら, 2001)。高濁度水塊は感潮河道のシルト・粘土が巻き上げられて形成されているか、河口干潟で巻き上げられた底質が感潮河道に遡上する現象であると考えられているが、その本質については不明な点が多い。本章では、白川感潮域において観察される高濁度水塊を対象に、その由来および懸濁物質の凝集状態を明らかにすることを目的として観測を行い、その化学組成、粒径組成を分析した。

### 3-2 研究方法

#### (1) 観測方法

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  $480 \text{ km}^2$ 、流路延長  $74 \text{ km}$  の一級河川である (図-3-1)。河口から  $4.4 \text{ km}$  地点 (4.4 KP) には農業用の取水堰があり、感潮区間はこれより下流となる。有明海に面する白川河口域は潮位差が最大  $4 \text{ m}$  程度 (TP:  $-2 \text{ m} \sim 2 \text{ m}$ ) と大きいため、上げ潮時には海水が強混合状態で河道内へと侵入する。干潮時には沖合  $2.5 \text{ km}$  程度まで幅  $4 \text{ km}$  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 製 Lisst-100; 写真-3-1) を設置して、水中における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 製 MS-1000; 写真-3-2) を同地点の底上  $150 \text{ cm}$  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  $0.5 \text{ m}$  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 製 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製 Vector 6MHz；写真-3-3）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。

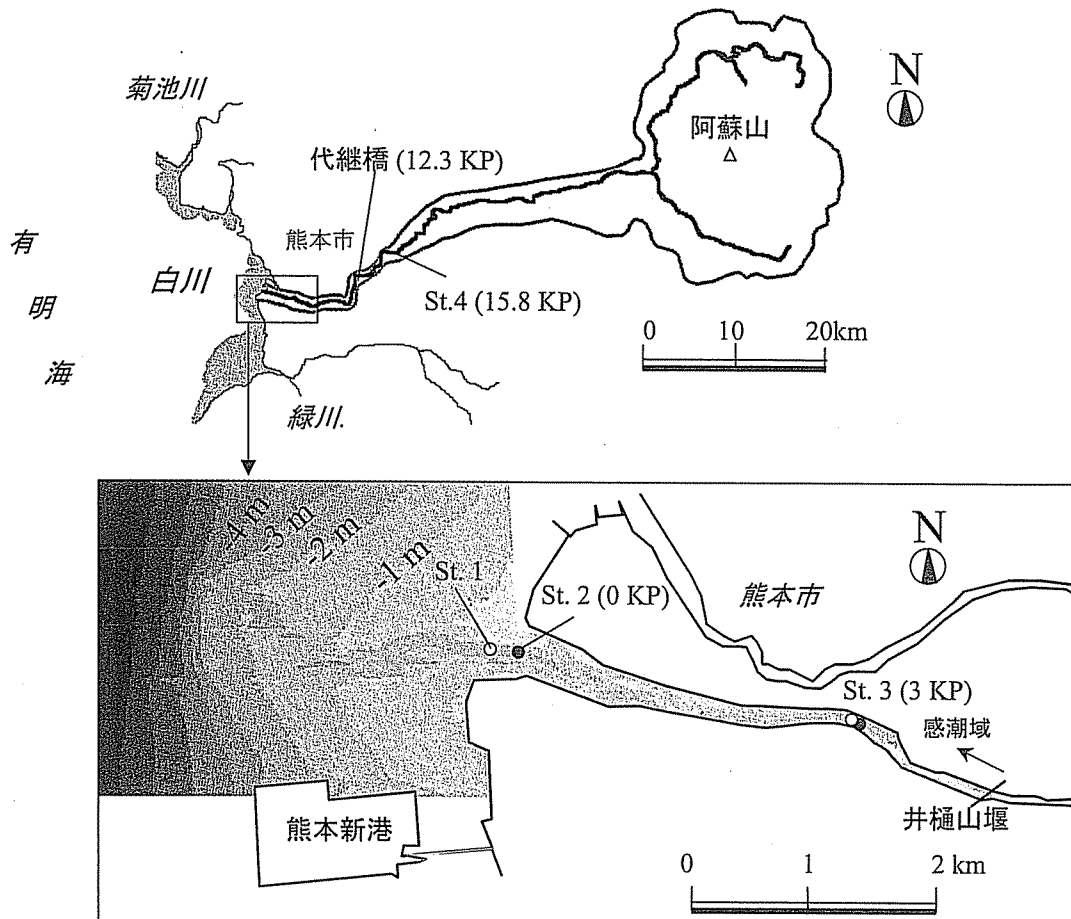


図-3-1 調査対象水域（白川）

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 St.1 および 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の鉛直プロフィールを取得し、採水を行った。同時に St.2 と St.3 の河床に埋設された ADCP（Nortek製 Aquadopp 2MHz；写真-3-4）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地点では表層底泥を採取した。水、底質につ

いて 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, フロック破砕後の粒度分布をレーザー粒度分析計 (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乱流拡散によるフロックの破壊が主に関わっているとされている(土木学会, 2004). このうち乱流場である開水路では①に比較して②と③が懸濁物質の凝集・破壊について卓越する要因であると考えられる.

②に関して, 水槽内の流速勾配について, 水槽内で消費されるエネルギーを用いて Camp が (3.1) 式で表される  $G$  値を提案している (Camp, 1953).

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon^*}{\mu}} \quad (3.1)$$

ここで,  $G$ : 総括攪拌強度指標 ( $s^{-1}$ ),  $\varepsilon^*$ : フロッキュレーター全体のエネルギー逸散率 ( $J \cdot m^{-3}$ ),  $\mu$ : 流体の粘性係数 ( $Pa \cdot s$ ) である.

開水路の条件では,  $G$  として (3.1) 式のかわりに (3.2) 式で与えられる絶対流速勾配  $G$  ( $s^{-1}$ ) を適用することができる (小田ら, 2002).

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2} \quad (3.2)$$

一般に感潮域の流動は鉛直分布が卓越するため  $\partial u / \partial z$  および  $\partial v / \partial z$  が他の項に比べて卓越するので,

$$G \cong \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \quad (3.3)$$

とおき, 超音波流速計で得られた流速から鉛直各層の  $G$  を計算し, 平均値を算出した. 次に, ③に関連して, 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 ( $m^2 \cdot s^{-2}$ ) は (3.4) 式で定義される.

$$TKE \equiv \frac{(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}{2} \quad (3.4)$$

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

いま, 粒径  $a$  (m) のフ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  $\rho_s$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), フロックの有効密度を  $\rho_e(a)$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) とすると, 粒径  $a$  のフロックの乾燥重量  $W_F(a)$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) は

$$W_F(a) = \frac{\rho_e(a)\rho_s}{\rho_s - \rho_w} V_F(a) \quad (3.5)$$

で表される. また,  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) における沈降速度を  $w(T, a)$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) とおき, 沈降速度はフロックを正 8 面体近似したとき, 沈降速度がストークス式に従うとすると,

$$w(T, a) = \frac{\rho_e(a)}{25.5\mu(T)} ga^2 \quad (3.6)$$

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, 沈降速度の重量平均  $W_{Mean}$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) は, フロック粒子の最小粒径を  $a_{min}$ , 最大粒径を  $a_{max}$  とすると,

$$W_{Mean} = \frac{\int_{a_{min}}^{a_{max}} W_F(a)w(T, a)da}{SSC} \quad (3.7)$$

であらわされる. フロック化による沈降速度の影響を考えると,  $W_{Mean}$  がその指標となる. フ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,

$$J_{Mean} = W_{Mean} \cdot SSC \quad (3.8)$$

であらわされるから, 結局

$$J_{Mean} = \int_{a_{min}}^{a_{max}} W_F(a)w(T, a)da \quad (3.9)$$

$$= \int_{a_{min}}^{a_{max}} \frac{\rho_e^2(a)\rho_s ga^2 V_F(a)}{25.5\mu(T) \cdot (\rho_s - \rho_w)} da \quad (3.10)$$

であらわされる.

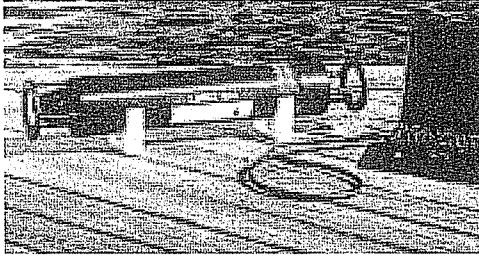


写真-3-1 現場設置型粒度分析計  
(Sequoia Scientific 製 Lisst-100)



写真-3-4 超音波流速計 (Nortek 製  
Aquadopp 2MHz)

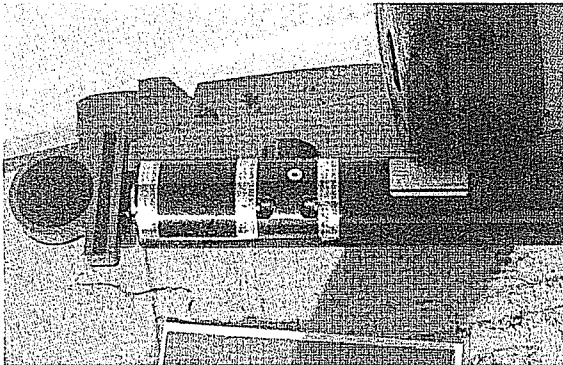


写真-3-2 ヘッド回転型スキャニ  
ングソナー (Simrad Mesotech 製 MS-1000)

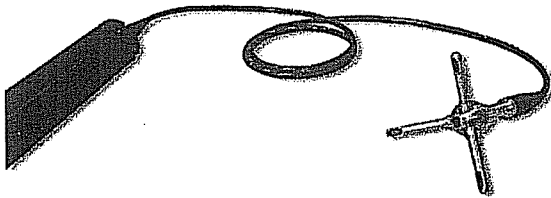


写真-3-3 精密超音波流速計  
(Nortek 製 Vector 6MHz)

### 3-3 研究結果

#### (1) 白川河口域における高濁度水塊の遡上

2004年連続計測した濁度の計測結果を図-3-2に示す。上げ潮に河口(0KP)でやや濁度が高くなってから約2時間後に3KPで濁度が急激に上昇した。濁度の上昇の程度は河口を上回る高濁度であった。濁度の高い状態の継続時間は30分間程度であった。

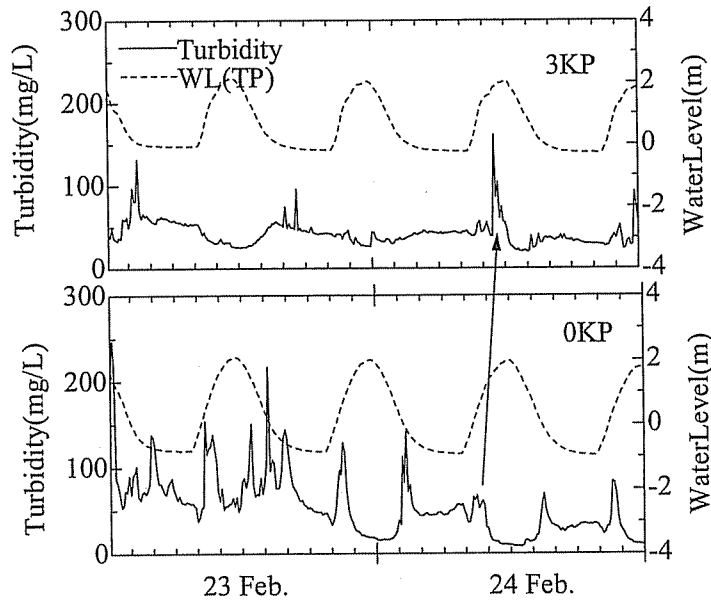


図-3-2 濁度 (Turbidity) の連続計測結果 (2004年2月23日~24日, 白川)

さらに詳細に計測したSS濃度, 電気伝導度 (EC) のグラフを図-3-3に示す。10:48に高いSS濃度が記録された。

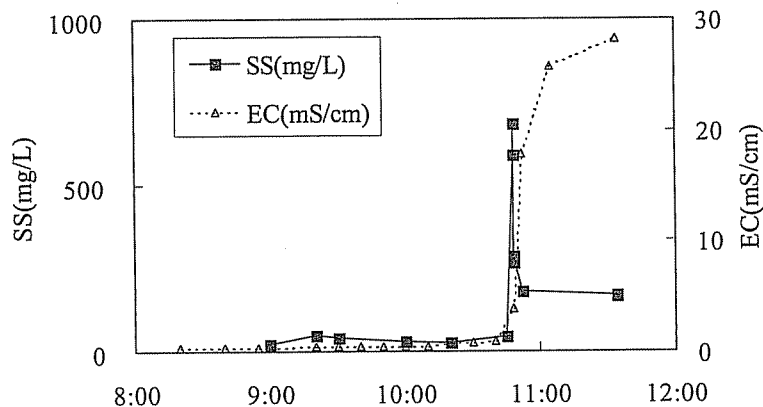


図-3-3 白川St.3におけるSS濃度・電気伝導度 (EC) の観測結果 (2004年2月24日)

ソナーによる音響探査の結果、3KP で高濁度となった 24 日 10:48 に、下流から底層を、音響を強く散乱する水塊が通過しているのが認められた (図-3-4)。音響画像は距離方向の補正がなされているので、図中の黒色の濃い部分は散乱強度が強い部分である。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-3-5に示す。10:48 より後では、下層に高濁度の塩水が存在することが分かった。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。この水塊の通過と同時にポンプによって採水した結果、SS 濃度は  $685 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、水温は  $10.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、塩分は  $2.77 \text{ psu}$  であり、塩水フロントの密度は  $1003.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、表層部の淡水の水温は  $12.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、塩分は  $0.26 \text{ psu}$ 、SS 濃度は  $22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  であり、密度は  $999.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  となった。

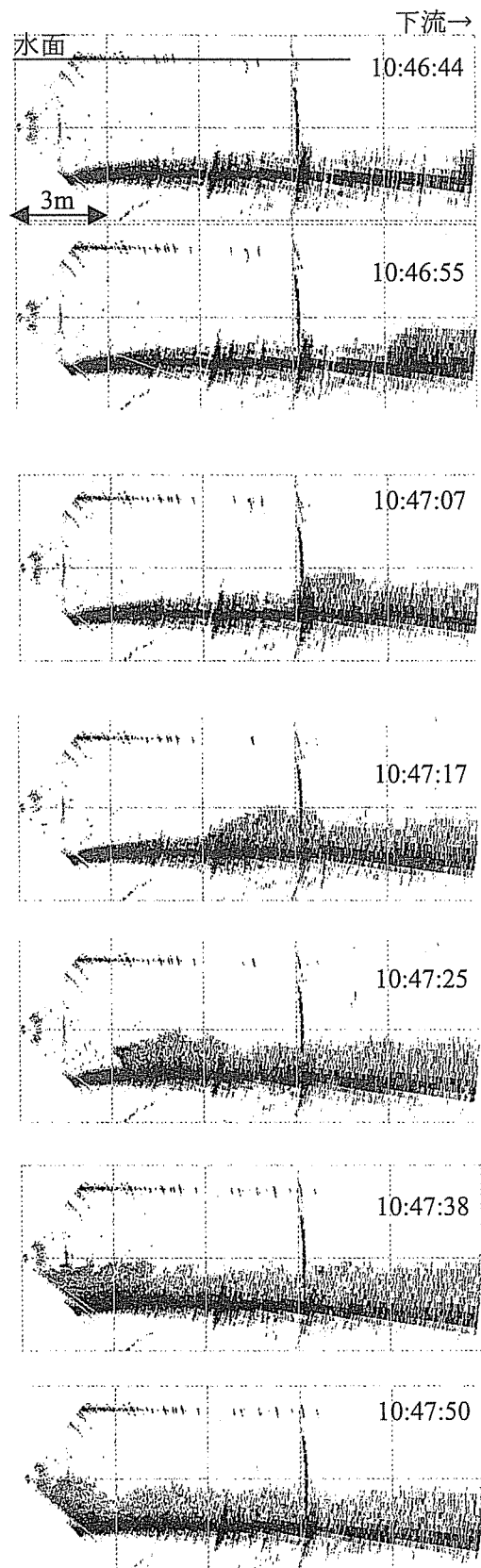


図-3-4 高濁度塩水フロントの連続スキャン結果（白川3KP, 2004年2月24日10:46～10:48, 図中のグリッド：3m)



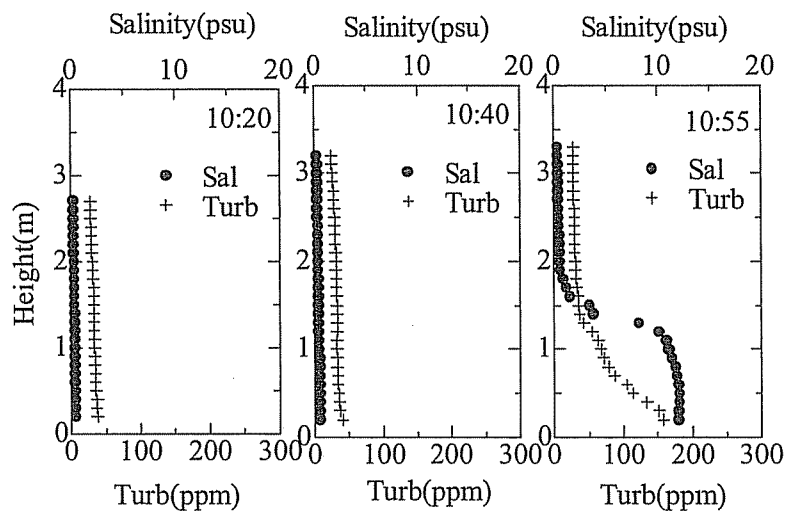


図-3-5 高濁度塩水フロント通過時の濁度 (Turb)・塩分 (Salinity) の鉛直分布  
(白川 St.3, 2004年2月24日)

強い散乱を示す水塊は速度  $0.38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  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密度カレント先端の形状に非常によく似ている。水塊が図上左側に進行するにつれ、ソナービームが水塊を掃過する時間が長くなるため画像にゆがみを生じるが、10:46:55 の時点まで画像では水塊先端の通過に要する時間は 0.47 秒であるので、画像のゆがみはおおむね無視できる。図-3-6において非粘性流体を仮定した理論解析上は、 $\theta$  は  $60^\circ$  となることがわかっている (有田ら, 1998) が、実際に現地で確認された先端の角度  $\theta$  は粘性の効果のためか、 $60^\circ$  よりも小さかった。

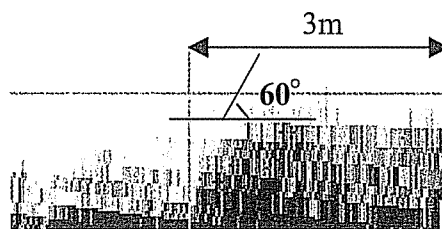


図-3-6 塩水フロント先端の拡大図

(白川 St.3, 2004年2月24日 10:46:55, 図中グリッド: 3m)

Lock Exchange Flow における密度流の進行速度と比較するため、(3.11) 式～ (3.13) 式からなる Benjamin が導いた関係式 (Benjamin, 1968) によって高濁度水塊の進行速度を評価した。

$$\frac{U}{\sqrt{g'h}} = \sqrt{\frac{(1-n)(2-n)}{1+n}} \quad (3.11)$$

$$n = \frac{h}{H} \quad (3.12)$$

$$g' = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1} g \quad (3.13)$$

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,  $\rho_1$  : 軽い流体の密度,  $\rho_2$  : 重い流体の密度

実測された速度と計算値を比較した (図-3-7). 実測値は理論上の水塊の速度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横断面形状や底面の摩擦が原因であると考えられる. 白川河口は強混合感潮域に分類されるが, 満潮に近くなって上げ止まると, 塩淡水層流に遷移する. これは Lock Exchange Flow のような流動であることが分かった.

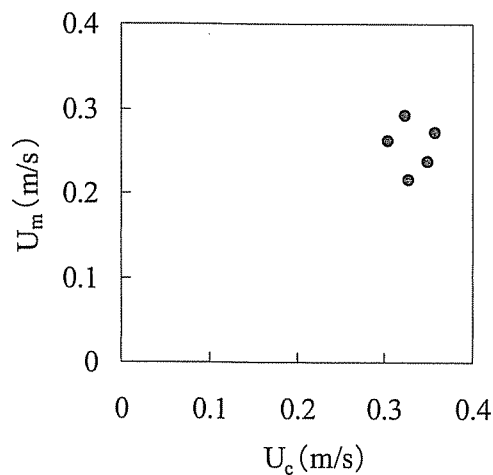


図-3-7 Benjamin の式による密度流の流速の計算結果 ( $U_c$ ) と実際に観測された流速 ( $U_m$ ), 白川 St.3, 2004 年 2 月 24 日

## (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, 底質と水中懸濁物質の PN, PP, PRP, POC, PFe, Chl-a 組成および  $1.0 \sim 54.8 \mu\text{m}$  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-3-8, 図-3-9). 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.

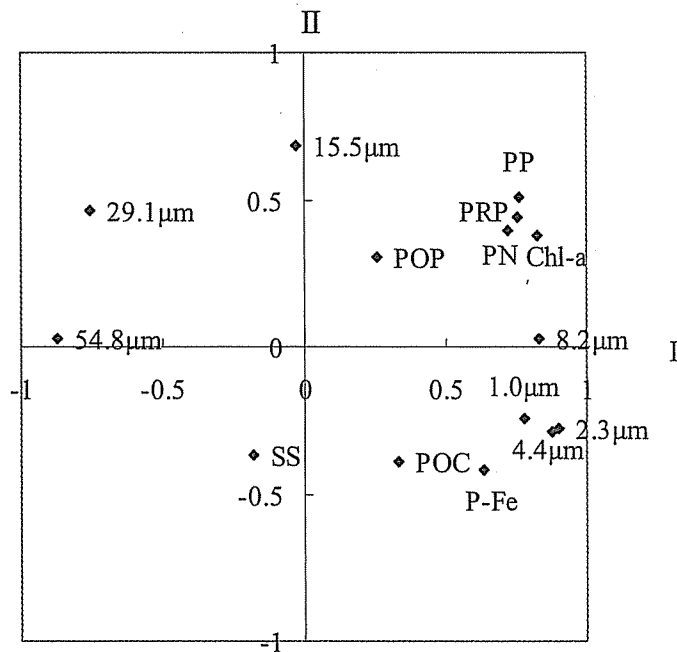


図-3-8 高濁度水塊中の懸濁物質の主成分負荷量分布

(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、塩水塊の後方、すなわち海側では第1主成分得点が大きく、どちらかといえば海側の懸濁物質に近いことを示している (図-3-10)。高濁度水塊について、常にフロントの速度 ( $0.38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) は高濁度水塊の後方の速度 ( $0.25\sim 0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 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。以上より、塩水フロント先端では海域から流入する塩水によって海域の懸濁物質が遡上するが、高濁度塩水フロントの先端部では強い乱れによって懸濁物質が巻上げられ、そのまま塩水塊にとりこまれて河川を遡上していることがわかった。

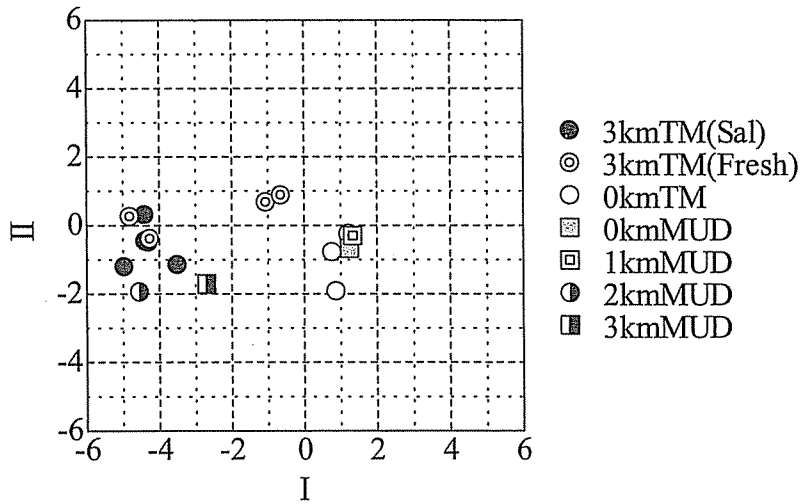


図-3-9 高濁度水塊中の懸濁物質の主成分得点分布

(TM (Sal) : 塩分を含んだ高濁度水塊, TM (fresh) : 淡水の高濁度水塊, MUD : 底泥)

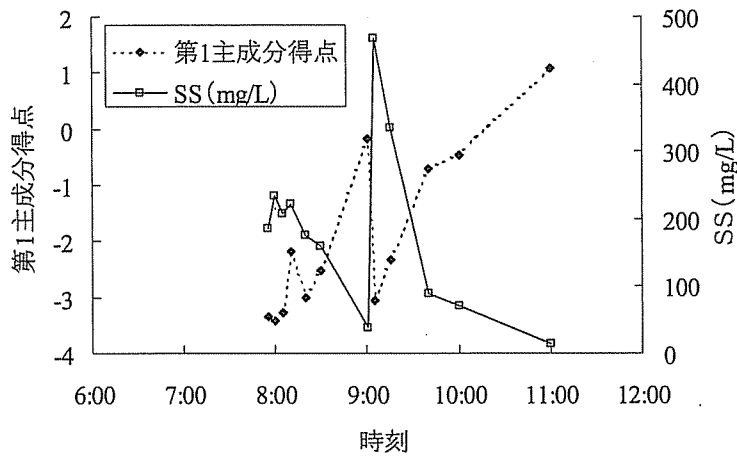


図-3-10 高濁度水塊中における懸濁物質の主成分得点の時系列変化

(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

高濁度水塊中の懸濁粒子の画像を高濁度水塊の先端部の懸濁物質をバンドン採水機で捕集し、現地において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  $\mu\text{m}$ 、577  $\mu\text{m}$ 、900  $\mu\text{m}$  であった。デジタル顕微鏡で撮影したフロックを図-3-11に示す。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  $\mu\text{m}$ , 15.5  $\mu\text{m}$ , 73.7  $\mu\text{m}$ であったので、高濁度水塊内部では懸濁物質が凝集・フロック化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 によるとそれぞれ81  $\mu\text{m}$ , 276  $\mu\text{m}$ , 426  $\mu\text{m}$ であり、凝集していることを示していた。ただし500  $\mu\text{m}$ 以上の測定が不可能であるので、検鏡結果とは異なっていた。このように高濁度水塊中の懸濁物質はフロック化しており、非常に大きな凝集粒子により構成されている。

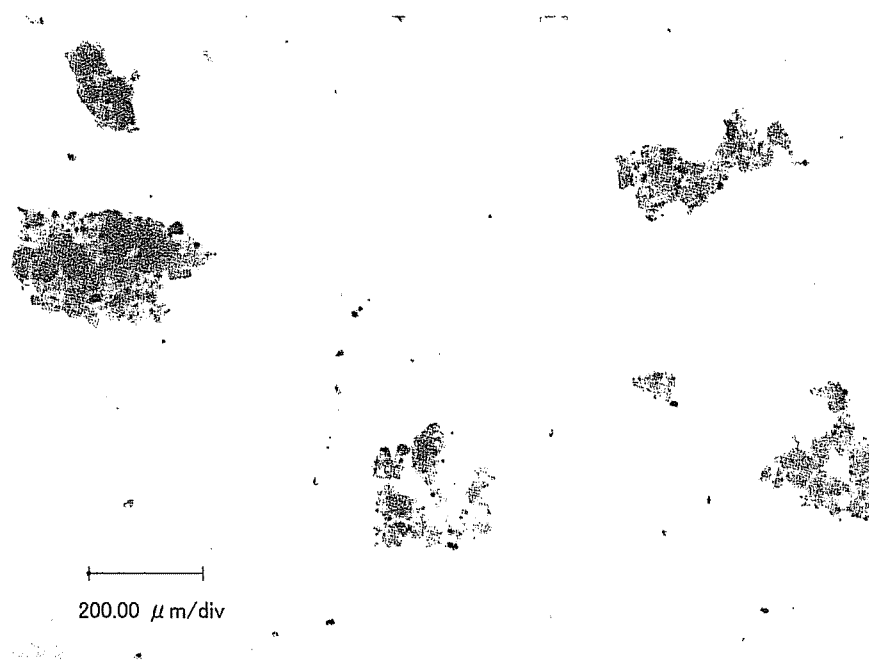


図-3-11 高濁度水塊中の懸濁物質（白川St.3, 10:48 バンドン採水器によって底上50cmの水を採取）

#### (4) 白川感潮域におけるフロック形成の要因

高濁度水塊中の懸濁物質は凝集状態への寄与を明らかにするため、濁質の凝集状態の要因について検討した。図-3-12に塩分と Lisst-100 によって観測されたフロックの粒径の状況を示す。図-3-12において2月23日22時以前は電気伝導度が0.5mS/cm以下であったが、フロックの50%粒径(D50)と90%粒径(D90)はそれぞれ150  $\mu\text{m}$ から200  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ から400  $\mu\text{m}$ へ増大している。このことは淡水の環境においてフロックの粒径が大きくなっていることを示している。なお、全期間で懸濁粒子の粒径は超音波破碎後200  $\mu\text{m}$ 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。

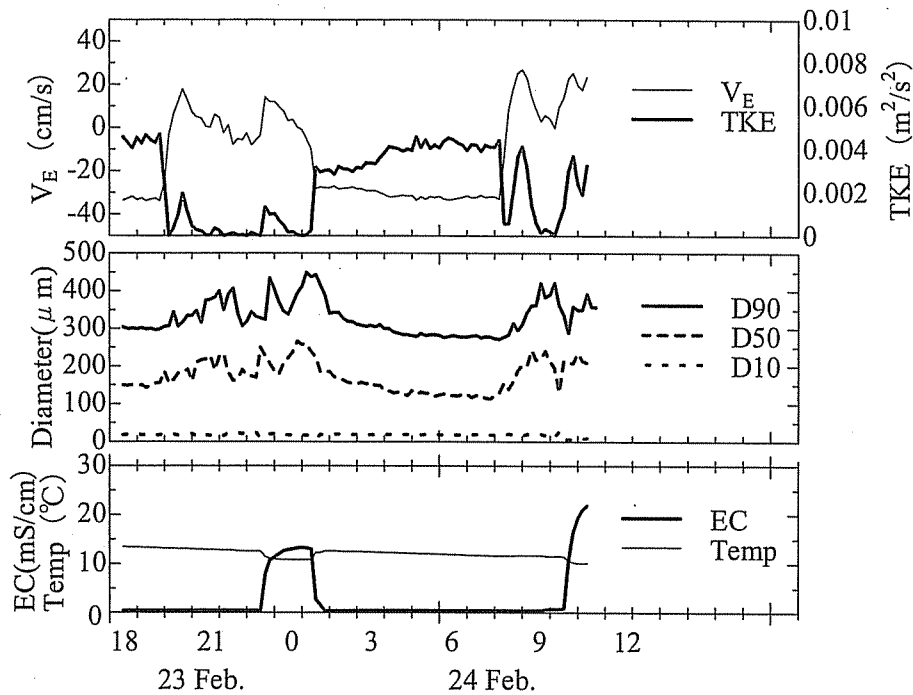


図-3-1-2 底面上50cmにおける東方流速成分(逆流)流速および乱流エネルギー(上), 代表粒径(中), 水温(Temp)および電気伝導度(EC)(下), 2004年2月23日~24日, 白川St.3

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、フ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フ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みられる。感潮域の底質は海水と接触履歴があり、生物の活動が活発であるために塩分に関係なくフロック化していると考えられる。

懸濁物質フロックの粒径の予測のため、重回帰分析により回帰式を作成した。重回帰式は諸変数の積により表現されるものと考えられたから、すべての変数の常用対数について重回帰分析を行った。

懸濁物質の50%径の常用対数値を目的変数とし、TKEの常用対数値( $\text{Log}_{10}\text{TKE}$ )、鉛直方向のGの最大値の常用対数値( $\text{Log}_{10}\text{G}_{\text{max}}$ )、電気伝導度の常用対数値( $\text{Log}_{10}\text{EC}$ )、SS濃度を説明変数として重回帰分析(変数減少法)により解析した。これまでの考察から、塩水フロント内外の懸濁物質の由来が異なる可能性があることがわかったので、塩水フロントの内外について考慮するため、電気伝導度0.6 mS/cmを境界として場合分けした。解析の結果得られた偏相関係数を表-3-1に示す。

塩水フロント外(0.6mS/cm以下)の場合、50%粒径の対数値( $\text{Log}_{10}\text{D}_{50}$ )は $\text{Log}_{10}\text{EC}$ と

Log<sub>10</sub>TKE との関数で示される。偏相関係数はそれぞれ 0.3579, -0.4986 であり, Log<sub>10</sub>EC については 5%で有意, Log<sub>10</sub>TKE については 1%で有意であった。すなわち, EC については正の相関があることから, フロックの粒径が増大する方向に, TKE はフロックの粒径が減少する方向にはたらく傾向が示された。他の変数 (G<sub>max</sub>, SS) についてはほとんど相関が認められなかった。河川感潮域において淡水の環境では潮止まりなどにおいて流体の乱流エネルギーが弱くなる環境においてフロックが形成されることを意味しており, 塩分の混合によってよりフロック化が促進されているらしい。

一方, 塩水フロント内部では Log<sub>10</sub>TKE (偏相関係数: -0.4358) 以外の変数は相関が認められなかった。すなわち塩水フロント内部では水理・水質的要因によるフロックの形成が起こっておらず, 乱流による破壊のみが卓越していることになる。前述したように高濁度水塊中の懸濁物質の由来を考えると, 河床あるいは海域の底質が塩水フロントの通過により表層が破壊・巻き上げられて, 塩水フロント内部に取り込まれて河川感潮域を遡上すると考えられる。

白川 3KP 地点で得られた代表粒径の経験式を以下に示す。

(電気伝導度: 0.6mS/cm 以下; 淡水)

$$D_{50} = 346EC^{1.44}TKE^{-0.0449} \quad (3.15)$$

(電気伝導度: 0.6mS/cm 以上: 汽水~海水)

$$D_{50} = 114TKE^{-0.0639} \quad (3.16)$$

ここで  $D_{50}$ : 50%粒径 ( $\mu$ m), EC: 電気伝導度 (mS/cm), TKE: 乱流エネルギー ( $m^2/s^2$ )

表-3-1 白川3KPにおけるフロックの50%粒径の重回帰分析結果\*

(白川3KP, 2004年2月23日~24日) \*変数減少法による

	重回帰係数	標準重回帰係数	偏相関係数	単相関係数
EC ≤ 0.6mS/cm				
Log <sub>10</sub> EC	1.441	0.3365	0.3579	0.6892
Log <sub>10</sub> TKE	-0.0449	-0.5049	-0.4986	-0.7400
定数項	2.539	-	-	-
EC > 0.6mS/cm				
Log <sub>10</sub> TKE	-0.06385	-	-	-0.4358
定数項	2.075323	-	-	-

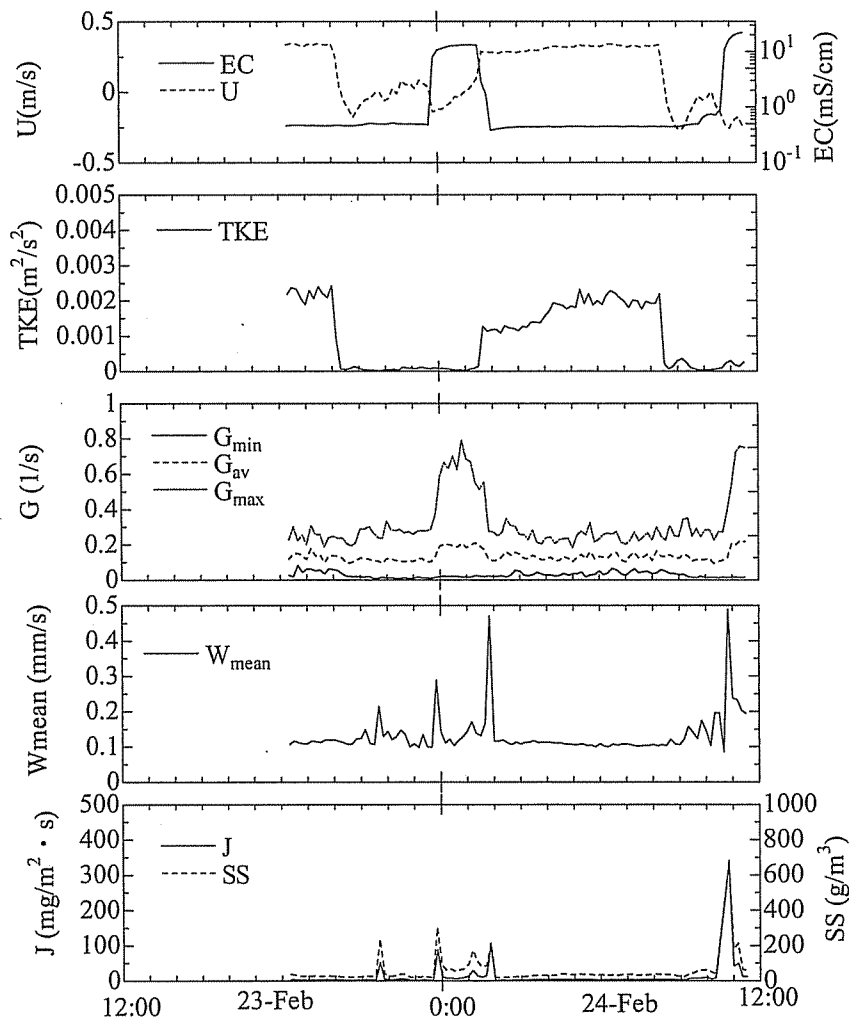


図-3-1-3 白川 St.3 における水理環境と懸濁物質の沈降フラックス

(U: 底面から 50cm 地点の東方成分 (逆流) 流速 (m/s), EC: 電気伝導度 (mS/cm), TKE: 乱流エネルギー ( $m^2/s^2$ ), G: 攪拌エネルギー (1/s), Wmean: 重量平均沈降速度 (cm/s), J: 懸濁物質の沈降フラックス ( $cm/s$ ), 2004 年 2 月 23 日~24 日, 白川 St.3)

フロックは塩水による荷電中和のみではそれほど粗大にならないことがわかっており、高分子化合物の架橋構造を必要とする。架橋を促す物質としては藻類から分泌される高分子多糖類 (Gary,1997) や塩水環境中で自ら凝集するフミン質や鉄があげられよう。また、フロックの内部には多数の藻類が認められるから、微生物が分泌するポリマーも懸濁物質の架橋を促している可能性がある。このように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。St.3 における流速、塩分、TKE (平均流速からの推定値)、G 値、重量平均沈降速度、懸濁物質の沈降フラックスを図-3-1-3 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  $1 \text{ mm}$  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前述のとおり底泥に堆積した懸濁物質あるいは底泥そのものが活発に巻き上がっており、一方的に沈降しているのではない。

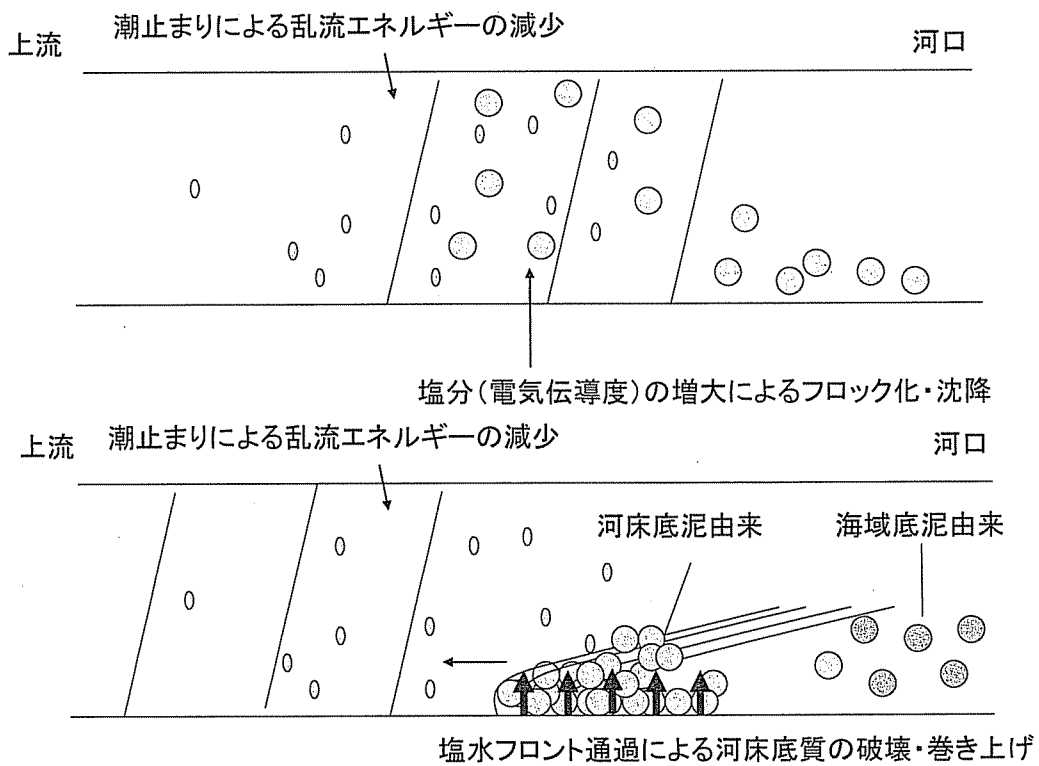


図-3-14 白川感潮域における凝集過程と塩水フロントの通過による高濁度水塊の発生概念図

### 3-4 まとめ

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。

- ・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。上げ潮時に巻上げられた底質は満潮時の潮止まり時に乱流エネルギーの減退に伴い凝集しやすくなりフロックを再形成して底層に堆積する。淡水中においても水中のフロックの粒径が大きくなっていることから、塩分にほとんど関係なく憩流による乱流エネルギーの減少がフロックの粒径の粗大化に寄与することが明らかになった。

- ・上記の過程で堆積したフロックは塩水フロントの到来に伴って一気に巻上げられ塩水フロントの内部に取り込まれて感潮河道を遡上する。

- ・懸濁物質が取り込まれた塩水フロントは約  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  の高 SS 濃度となる。そのフロントは開放交換流で生じる密度カレントの形態であった。

- ・白川で観測された密度流による懸濁物質の搬送機構は感潮域の細粒底質の堆積に大きな影響を与えている可能性がある。

#### <参考文献>

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

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

土木学会編（2004）：環境工学公式モデル・数値集，pp.9-15

T. B. Benjamin (1968): Gravity currents and related phenomena, J. Fluid Mech. Vol.31, No.2.

小田一紀，大石大輔，影地良昭，汪思明(2002)：塩水中における長江河口微細浮遊砂の凝集過程と凝集機構に関する研究，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.1476-1480.

有田正光編著（1998）：水圏の環境，東京電気大学出版局，pp181.

Camp,T.R. (1953): Flocculation and flocculation basins, Proc. A.S.C.E., Vol.79, No. 283, pp. 1-18.

Gary G. Leppard(1997): Colloidal organic fibrils of acid polysaccharides in surface waters: electron-optical characteristics, activities and chemical estimates of abundance, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Volume 120, Issues 1-3, 21 February 1997, Pages 1-15.