

第4章 河口域における土砂・栄養塩収支

4-1 はじめに

閉鎖性海域の水質保全や河口域の干潟生態系維持能力の評価のためには、河川流域から供給される土砂・栄養塩類の供給量を正確に把握する必要がある。河川流域から流出する土砂・栄養塩は、ほとんどの場合感潮域を経て海域へ供給される。感潮域においては第3章で述べたように懸濁物質等は海水との接触により凝集・沈殿し、潮汐により引き起こされる流動にともなって再移動する。このように感潮域に存在する懸濁物質は常に流動しているから、河川から海域へ流出する土砂・栄養塩の流出負荷量を算出するためには感潮域における懸濁物質の流動を考慮に入れる必要がある。

とくに有明海などの潮位差の大きな沿岸の河川感潮域は、潮汐にともなう懸濁物質の逆流量は無視できず、宇野ら(2002)によれば、通年では中規模の洪水に匹敵する土砂が流動する。

生態系の維持能力に影響を与える細粒土砂や栄養塩の動態と同時に、底質は貝類や底生生物など、様々な生物が生息するための物理的基盤として重要であり、近年では環境問題に関する社会の関心が高まり、干潟の保全が求められている。

河口域には海水と淡水が会うことにより複雑な流況、土砂の流動状況を示すために、通常の河川における土砂モニタリング手法はそのまま適用できない。本章では第2章で検討した河口域における土砂・栄養塩のモニタリング方法を白川河口域に適用し、通年の土砂・栄養塩動態について述べる。

4-2 研究方法

(1) 調査対象水域

調査対象河川の白川は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。白川はその流域の 8 割を阿蘇カルデラが占める。年間降水量は阿蘇乙姫地点で 2833 mm (1979 年～2002 年平均)、阿蘇山で 3252 mm (1961 年～2002 年平均) と、比較的多い。河道 4.4 KP には取水堰(井樋山堰)があり、これより下流が感潮区間である。日本で最も大きな潮位差を有する有明海に面する白川河口域では潮位差が最大 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(塩分の鉛直分布が無い状態)で河道内へと侵入する。干潮時には沖合 2.5 km 程度まで幅 4km 程度の砂泥質の干潟が出現する(写真-4-1)。調査地点は感潮域に 3 地点 (St. 1～St. 3)、非感潮域に 1 地点 (St. 4) の、合計 4 点とした(図-4-1)。St. 1 は河口から 250 m 沖合、St. 2 は 0KP、St. 3 は 3KP、St. 4 は 15.8KP 地点である。また、感潮域に流入する河川流量は河川管理者が代継橋(12.3KP)観測所で測定した流量を用いた。調査日程を表-4-1 に示す。

表-4-1 白川河口域における観測日程および観測項目

観測名	内容	2001											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上流からの土砂・栄養塩供給	モニタリング												
	濁水採取												
地形変化	測量												
	底質採取												
平水期の土砂・栄養塩移動	モニタリング												
	集中観測												
観測名	内容	2002											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上流からの土砂・栄養塩供給	モニタリング												
	濁水採取												
地形変化	測量												
	底質採取												
平水期の土砂・栄養塩移動	モニタリング												
	集中観測												
観測名	内容	2003											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上流からの土砂・栄養塩供給	モニタリング												
	濁水採取												
地形変化	測量												
	底質採取												
平水期の土砂・栄養塩移動	モニタリング												
	集中観測												

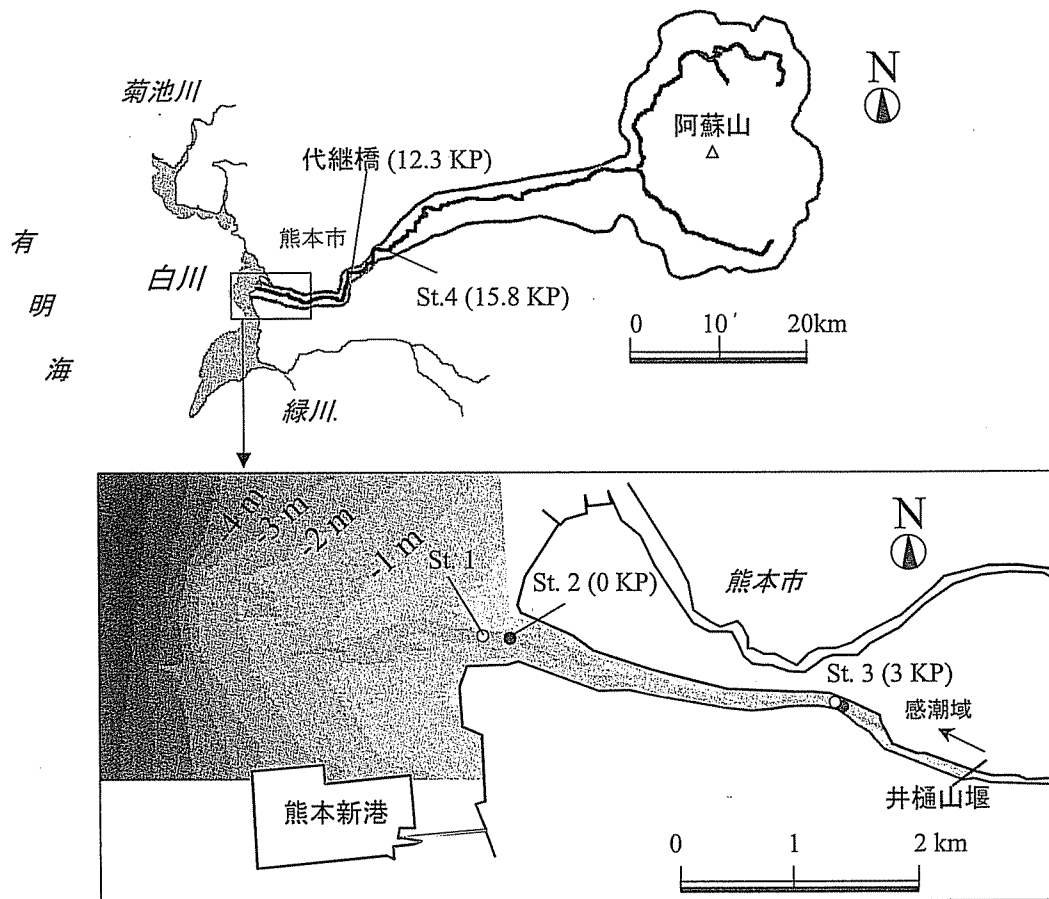


図-4-1 調査対象水域(白川)

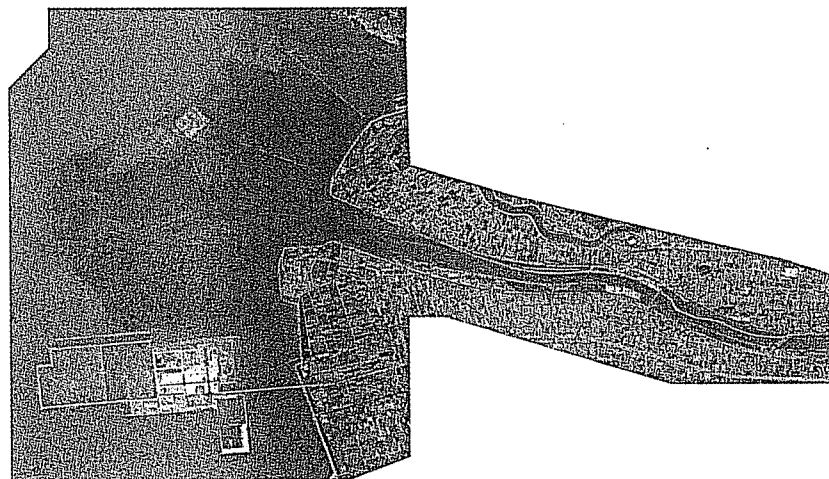


写真-4-1 調査対象水域(白川河口干潟 2004年4月, 最干潮時)

(2) 自記計測

自記式濁度計（アレック電子製 ATU5-8M）を St. 2, St. 3, St. 4 に設置した。さらに感潮域である St.2, St.3 には超音波流速計（Nortek 製 Aquadopp 2 MHz）を設置し、鉛直多層の3次元流速、および後方散乱音響強度を取得した。また鉛直多層に水温・塩分計を配置した。St. 4 の濁度計（20分間隔）を除く全ての計測機器の計測時間間隔は10分とし、通年のデータを取得した。詳細な計測位置を表-4-2に示した。

表-4-2 測定計器の設置状況

St.2 白川河道 0 km地点			
計測項目	塩分	濁度	流速
計測高さ (河床から)	0.25m, 1.00m, 1.75m, 2.50m,	0.25m	河床0.25mから 表面まで0.2mピッチ
使用機材 モデル	メモリー式塩分計 MDS-CT (アレック電子)	メモリー式濁度計 ATU 5-8M (アレック電子)	超音波流速計 Aquadopp 2MHz

St.3 白川河道 3 km地点 (小島橋)			
計測項目	塩分	濁度	流速
計測高さ (河床から)	0.25m, 1.00m, 1.75m, 2.50m,	0.25m	河床0.25mから 表面まで0.2mピッチ
使用機材 (モデル名)	メモリー式塩分計 MDS-CT (アレック電子)	メモリー式濁度計 ATU 5-8M (アレック電子)	超音波流速計 Aquadopp 2MHz

St.4 白川河道15.8km地点 (黒髪地区)			
計測項目	塩分	濁度	流速
計測高さ	設置せず	0.5m	設置せず
使用機材		メモリー式濁度計	
(モデル名)		ATU 5-8M (アレック電子)	

(3) 洪水時連続観測

洪水時の水質変化および濁度と土砂・栄養塩濃度の関係を明らかにするために白川代継橋および St.4 において洪水時に連続採水を行なった。現場では河川水の表層水をバケツで採取し、濁度検定用の艶消し黒塗装の容器に入れて直接濁度を測定した。サンプルはポリエチレン瓶に入れて冷蔵し、後日分析に供した。

(4) 地形測量・底質調査

河口干潟の地形変化量を粒径別に把握するため、2002 年については出水期 4 ヶ月後 (9 月 6 日)、6 ヶ月後 (11 月 5 日)、2003 年については出水期前 (6 月 1 日)、出水期後 (7 月 29 日)、3 ヶ月後 (10 月 1 日) に実施した。作業は音響測深機 (千本電気製 PDR101)、D-GPS (Trimble 製 PRO-XR) を作業船に搭載して鉛直位置と水深を同時に把握した。測量船の鉛直位置については熊本港験潮基準点の潮位と St.2 における潮位から東西方向に水面勾配が卓越していると考え、経度のみを用いて内挿した。

測線は岸と平行に 200m 間隔で沖合 4km まで設定した。底質採取は干潟の幅 2.5km、沖合 3km までの範囲において 47 地点で実施し、採取過程で土砂の含水率などが変化しないようにダイバーによる直接採取を行い、サンプル容器に密封した。底質は実験室にて密度、含水率、粒度分布を測定した。なお、音響測深の精度は放電紙の読みとり精度や船の動揺の関係で約 5cm である。

(5) 水質分析

懸濁物質 (SS)、全窒素 (TN)、全リン (TP)、溶存態窒素 (DN)、溶存態リン (DP)、懸濁態窒素 (PN)、懸濁態リン (PP)、硝酸態窒素 (NO_3^- -N)、亜硝酸態窒素 (NO_2^- -N)、アンモニア態窒素 (NH_4^+ -N)、溶存態反応リン (DRP)、懸濁態反応リン (PRP)、溶存態有機リン (DOP)、溶存態反応リン (DRP)、懸濁態反応リン (PRP)、溶存態有機リン (DOP)、全有機炭素 (TOC)、溶存態全有機炭素 (DOC) を自動分析により分析した。SS については $0.45 \mu\text{m}$ メンブレンフィルターを用いた重量法、TN、DN、TP、DP についてはペルオキシ二硫酸カリウム分解後 BRAN+LUEBBE 社 TRAACS による分析を行った。 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、DRP についても TRAACS で測定した。TOC、DOC については島津 TOC-5000A により測定した。懸濁物質 (SS)、次項に示す各態有機炭素、栄養塩を分析した。ただし栄養塩の分画は次式に従った。

① 有機炭素

$$\text{TOC} = \text{POC} + \text{DOC} \quad (4.1)$$

② 窒素

$$\text{TN} = \text{PN} + \text{DN} \quad (4.2)$$

$$= \text{PN} + \text{DON} + \text{DIN} \quad (4.3)$$

$$= \text{PN} + \text{DON} + \text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NO}_2^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N} \quad (4.4)$$

③ リン

$$\text{TP} = \text{PP} + \text{DP} \quad (4.5)$$

$$= \text{POP} + \text{DOP} + \text{TRP} \quad (4.6)$$

$$= \text{POP} + \text{PRP} + \text{DOP} + \text{DRP} \quad (4.7)$$

洪水時の連続採水は2002年6月24日～25日(代継橋), および2003年6月28日～29日(St.4), 7月12日(代継橋)の3回行なった。2002年および2003年の洪水時の実測データから求めた懸濁物質(SS), 懸濁態窒素濃度(PN), 懸濁態リン濃度(PP), 懸濁態有機炭素濃度(POC)はATU5-8Mで計測した濁度(Turb)に対して,

$$SS = 2.192 \times 10^{-1} \text{Turb}^{1.351} \quad (R^2 = 0.979) \quad (4.8)$$

$$POC = 3.19 \times 10^{-2} \text{Turb}^{1.080} \quad (R^2 = 0.923) \quad (4.9)$$

$$PN = 3.67 \times 10^{-3} \text{Turb}^{1.090} \quad (R^2 = 0.954) \quad (4.10)$$

$$PP = 2.80 \times 10^{-3} \text{Turb}^{0.991} \quad (R^2 = 0.968) \quad (4.11)$$

が得られ, 濁度の連続観測結果からこれらの濃度を連続的に推定した。

また, St.3(12.6KP)地点で連続的に測定された流量を用いて負荷を計算した。溶存物質について溶存態窒素負荷(DN Load), 溶存態リン負荷(DP Load)は(4.12)式, (4.13)式で算出した。

$$\text{DN Load} = 2.00Q^{0.8405} \quad (4.12)$$

$$\text{DP Load} = 0.0847Q^{0.814} \quad (4.13)$$

感潮域であるSt.1およびSt.2においては超音波流速計の反射音響データを(4.14)式でSS濃度に換算した。表-2-8より, 3KP地点について $a = 1.198$, $A = 87.12$, 0KP地点について $a = 1.877$, $A = 62.21$ とした。

$$EL = -20 \log R - 2 \alpha R + 10 \log (\psi \nu T / 2) + 10 a \log SS + A \quad (4.14)$$

ここで EL : 反射音響強度 (dB), R : 発信器からの距離 (m), α : 減衰係数 (dB/m), ψ : 音波のビーム幅 (rad), ν : 音速 (m/s), T : パルス長 (s), SS : SS濃度 (mg/L), a, A : 定数

懸濁態栄養塩濃度と超音波流速計の音響強度については第2章で検討したものの, 年間を通じたキャリブレーションを行なうことができなかったため, やむ終えず超音波流速計の音響データと流速データによって算出されたSS負荷量収支に, 2月時における感潮域(0KP-3KP)の底泥(シルト・粘土)あたりの栄養塩含有量(C:1.2%, N:0.18%, P:0.096%)を乗じて感潮域における懸濁態有機炭素, 懸濁態栄養塩の堆積量を算出した。

(6) 感潮域における平水時連続観測

平水時における感潮域の潮汐にともなう栄養塩負荷の流動を観測するため、2003年2月16日～19日に、St. 1, St. 3にて1時間以下の間隔にて連続採水し、かつ多項目水質計によって塩分・濁度の鉛直分布を測定した。調査の状況を写真-4-2に示す。また、調査日程を表-4-3に示す。調査終了時に河口から0KP, 1KP, 2KP, 3KPの滞筋で底質を採取した。特にSt.3では表層底質の30cmをカラム採取し、液体窒素で凍結後1cmの層厚に切断した。切断時の状況を図-4-2に示す。河川水および底質は後日SS濃度と化学成分濃度を分析した。底質は75 μ m以下の分画について上記に示す各態栄養塩、有機炭素に加え酸可溶性鉄、Chl-aを分析した。またSt.1, St.3では底上50cmにセディメントトラップを設置し、捕集される物質についても底質と同様に分析した。なお、酸可溶性鉄は原子吸光光度法で、Chl-aは蛍光光度法により分析した。

表-4-3 平水時連続観測の調査日程

	2003年			
	2月16日	2月17日	2月18日	2月19日
24時間連続観測		—————		
集中連続観測	—————			
セディメントトラップ調査		●	●	
底質採取				—————

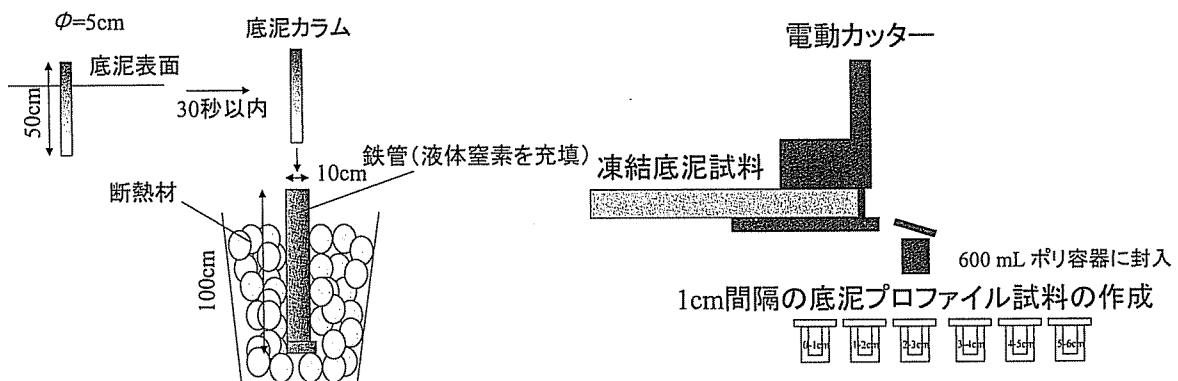


図-4-2 白川3KPにおける底質カラム採取の状況・試料作成方法



写真-4-2 平水時連続観測の状況（白川3KP）

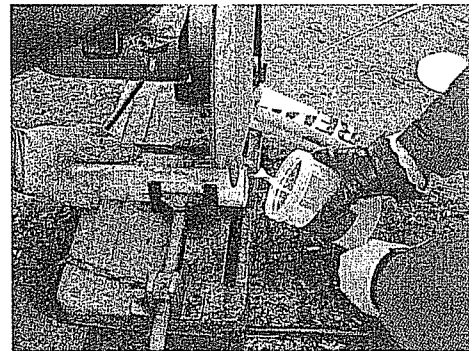
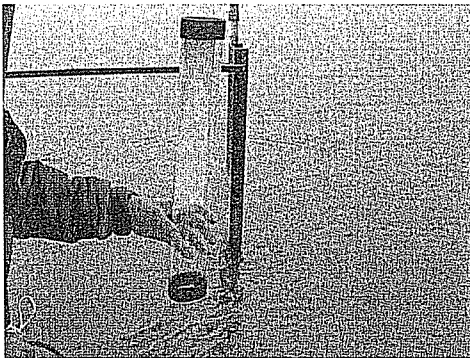


写真-4-3 白川3KPにおける底質カラム採取の状況・試料作成状況

4-3 上流域から供給される土砂・栄養塩負荷量

(1) 洪水時における土砂流出

2001年6月の出水時には3年確率程度の洪水が発生し、濁度計の最高計測濃度レンジである2000mg/lを超える濁度が観測され、このときについては実際に採水された濁水のSS濃度を用いた。上記データからSS負荷(通過土砂量)の時系列を算出することができ、通過土砂量の累積値を算出した。2001年には出水期に13.3万トンの土砂が、2002年には4.8万トンの土砂が上流から供給されたことがわかった。粒度分析の結果、 D_{50} (50%粒径)は0.01mm~0.02mm、 D_{90} は0.03~0.07mmの範囲にあり、出水時に流出する浮遊土砂はシルト・粘土であった。また、出水時に河口に堆積した底質の乾燥密度は0.05(t/m³)であった。以上から、2001年~2002年の2年間で河口部に18.1万トンの土砂(シルト・粘土)が供給されると算出された。ただし砂分の供給については不明であった。

(2) 洪水時における栄養塩負荷流出

洪水時における栄養塩濃度の変化の例を図-4-3に示す。流量の増加に伴い、懸濁態栄養塩濃度は著しく濃度が増加する。しかし、溶存物質の濃度は流量の増加に伴い減少傾向を示した。

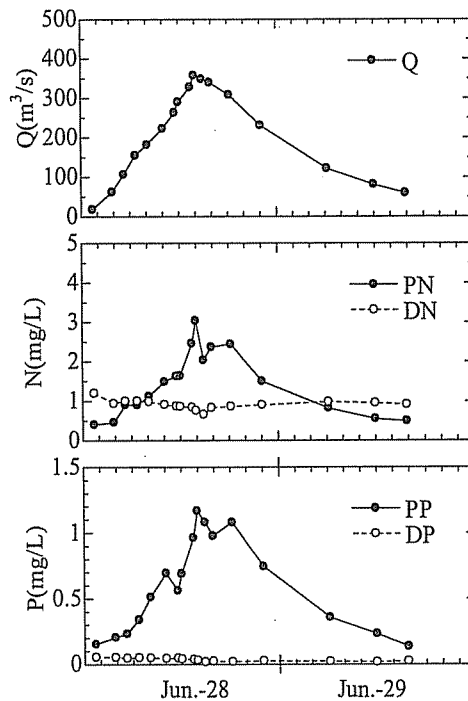


図-4-3 出水時における栄養塩濃度の変化(白川 St. 4, 2003年6月)

(3) 上流域から一年間に河口域へ供給される土砂、栄養塩負荷量

期間中の通年の濁度と流量を図-4-4に示した。2001年5月10日から翌2002年5月10日までの1年間(期間A)に16KPよりも上流から流出する面源由来の負荷量はSS:13.3万t, POC:3300t, PN:480t, DN:820t, PP:155t, DP:35tと求められた。また、年度ごとに比較するため、2002年3月1日から2003年2月28日(期間B)について計算すると、1年間ではSS:4.8万t, POC:1600t, PN:240t, DN:660t, PP:80t, DP:26tであった。期間Aと期間Bではそれぞれ梅雨期の流出負荷が考慮されているが、期間Bに対して期間AのSSおよび懸濁態栄養塩の流出負荷量は2倍程度となった。この原因は降水量の違いにあると考えられる。年間平均降水量(阿蘇山・高森・阿蘇乙姫 AMeDAS データ)は期間Aで2305mm, 期間Bで1902mmであり、顕著な違いは無かったが、期間Aにおいては2001年6月28日に時間最大降水量が81mm(阿蘇乙姫地点)を記録し、代継橋におけるピーク流量は1100m³/sに達した。一方、2002年は最も規模の大きな5月15日の出水でもピーク流量は842m³/sであった。また、期間降水量についても、期間Aの降水量は多く、2001年6月・7月の2ヶ月間で流域平均1241mmの降雨があったのに対して期間Bでは2002年4月～7月の4ヶ月間で1382mmであった。

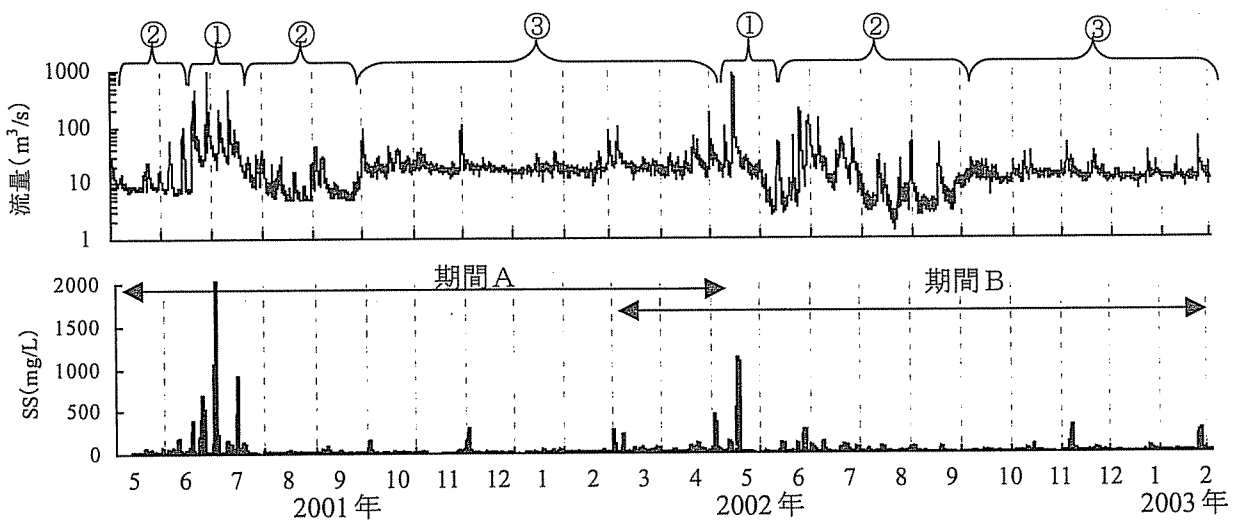


図-4-4 白川13km地点における流量と16km地点におけるSS濃度, 2001年5月～2003年2月; ①: 出水期, ②: 灌漑期, ③: 非灌漑期都市域からの土砂・栄養塩負荷量

4-4 都市域からの土砂・栄養塩流出負荷量

熊本市街より下流において白川には2カ所の下水処理場の排水が流入する。下水処理場からの負荷量は晴天時, 雨天時ともに高級処理水質(活性汚泥法による2次処理水)で放流されるとして計算した。その場合2カ所の下水処理場からは合計で2002年度では年間にSS:93t, T-N:440t, T-P44tが放流されたことになる。なお、このうちSS:32t, T-N119t, T-P19.4tは農業用水として水田に供給されているが、水田における水質

変換については現場の実測値がないため、下水処理場の排水を水田で利用したことによる質的变化は無視した。下水処理場の公表データには懸濁態栄養塩の濃度は掲載されていなかったため、処理場の了解を得て処理水を分析した。分析結果の一例を図-4-5に示す。窒素の90%以上は無機の溶存態窒素であり、リンについては90%以上が無機の溶存態であった。

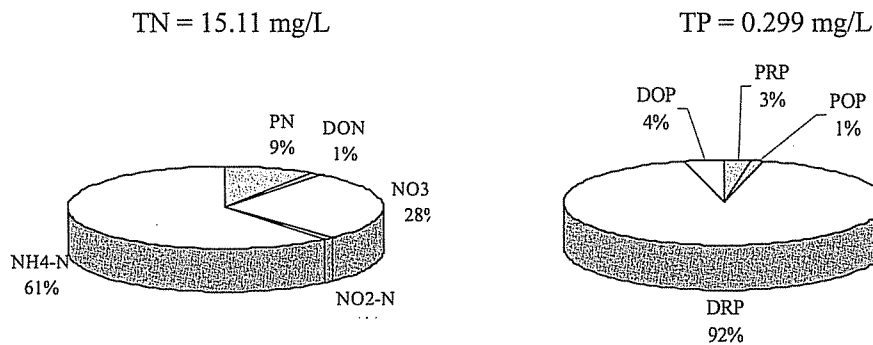


図-4-5 熊本市における下水処理場放流水の栄養塩組成の例 (左:窒素, 右:リン)

よって、下水処理場からの栄養塩については流出形態のほぼ9割以上が溶存態と考えられる。なお、懸濁態窒素およびリンはSS濃度と相関が高く、SSの4.2%がPN、SSの0.89%がPPであると考えてよい。よって、年間の負荷収支を計算する際にはSS負荷量を基準にPN、PPの負荷量を計算した。

4-5 河川感潮域で流動する土砂の流動特性

(1) 平水時の河川感潮域における土砂の流動特性

2002年3月から2003年2月までの河川流量、潮位、河口の濁度、河道の濁度を図-4-6に示す。河口では小潮から大潮を経て小潮に至る半月周期の土砂濃度のピークがみられ、潮汐によって干潟の土砂が巻きあがっていることが分かる。一方河道3kmでは出水期を除き、河川流量の高くなる非灌漑期(10月~翌4月)ではSS濃度は200mg/l程度であるが、河川流量の低くなる灌漑期(7月~9月)は土砂濃度が500mg/lに達し、濃度が高くなることが分かる。著者らは別途集中観測によって、上げ潮時に河口から河道へと土砂濃度が高い水塊(高濁度水塊)が河道に遡上することを確認している(横山ら, 2001)が、河口において巻きあがった土砂(シルト・粘土成分)の1潮汐における河道内への侵入量は潮位差と河川流量によって左右されている可能性が大きい。白川においては中潮~大潮期には海水が強混合状態で河川感潮域を遡上する。2003年2月の集中観測時における、河口(St.2)における鉛直2次元流速および反射強度分布を図-4-7に、同時にSt.2で取得した水質

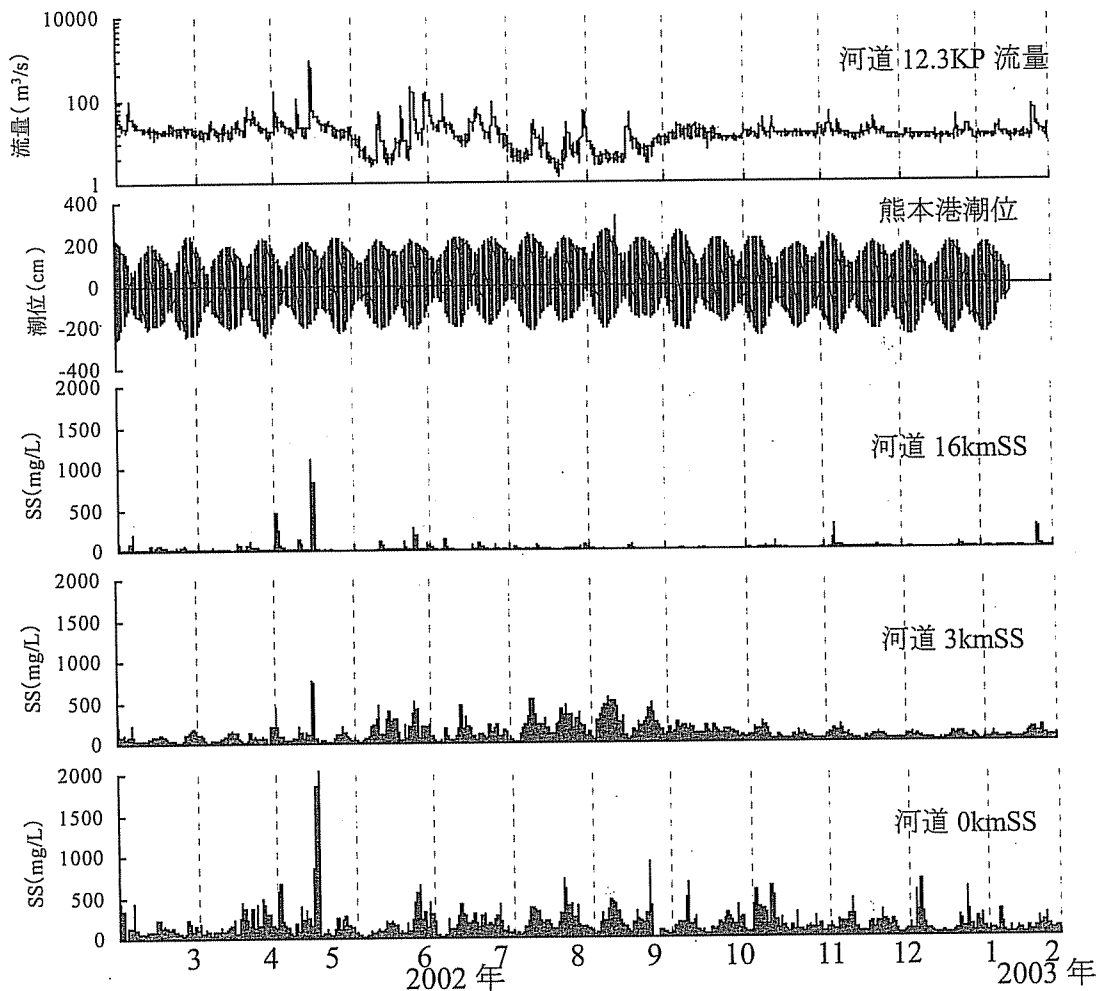


図-4-6 白川下流域における流量，潮位，土砂濃度

の連続観測結果を図-4-8に示す。河口では、上げ潮時に水深方向一様に逆流した後、満潮直前で憩流し、底層の海水は流れが澱んだままとなって淡水が表層1m程度を流下する。引き潮時は塩水層が徐々に薄くなり、干潮時に全層一様に淡水となることがわかる。SS濃度は高流速のとき、底層で塩分が急変するときに高くなる傾向にある。前者は底面せん断応力の増大によって河床の底質が巻き上げられること、後者は懸濁物質が集積した塩水フロントが通過するためであると考えられる。

一方、河道3KP(St.3)では、上げ潮時に強混合状態で逆流し、満潮直前に憩流となり、底層を塩水フロントが遡上して鉛直2層流に転ずる(図-4-9)。上層は順流だが、底層は塩水が侵入して逆流状態となり、エスチャリー循環が生じている。周期50分程度のセイシュを伴うことも読みとれる。St.3においては塩水フロントが付近の底質を巻き上げながら河道を遡上するので、塩水フロントの通過時にはSS濃度が急上昇する(図-4-10)。

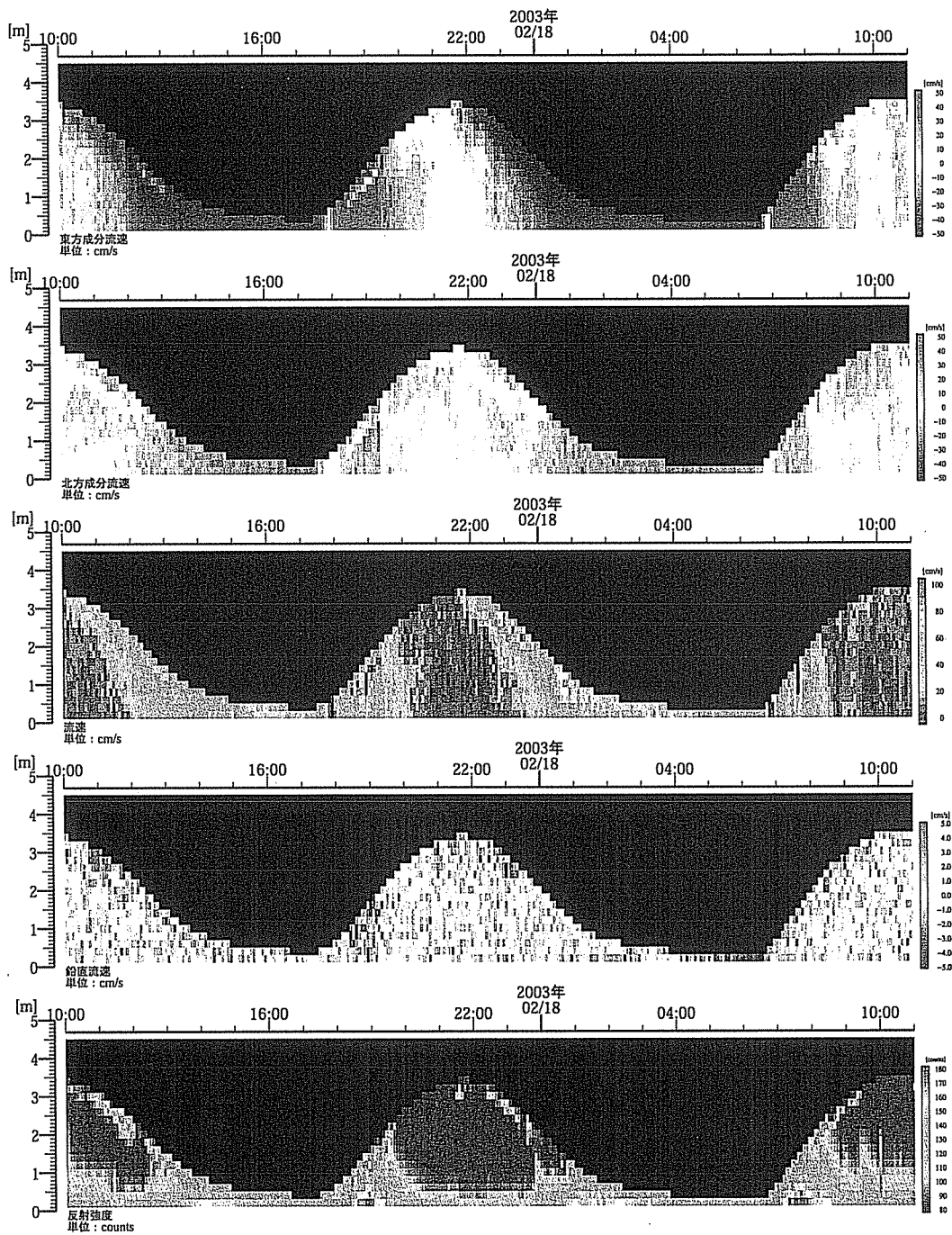


図-4-7 河口における流速および反射強度の観測結果(2003年2月24日, 白川OKP)

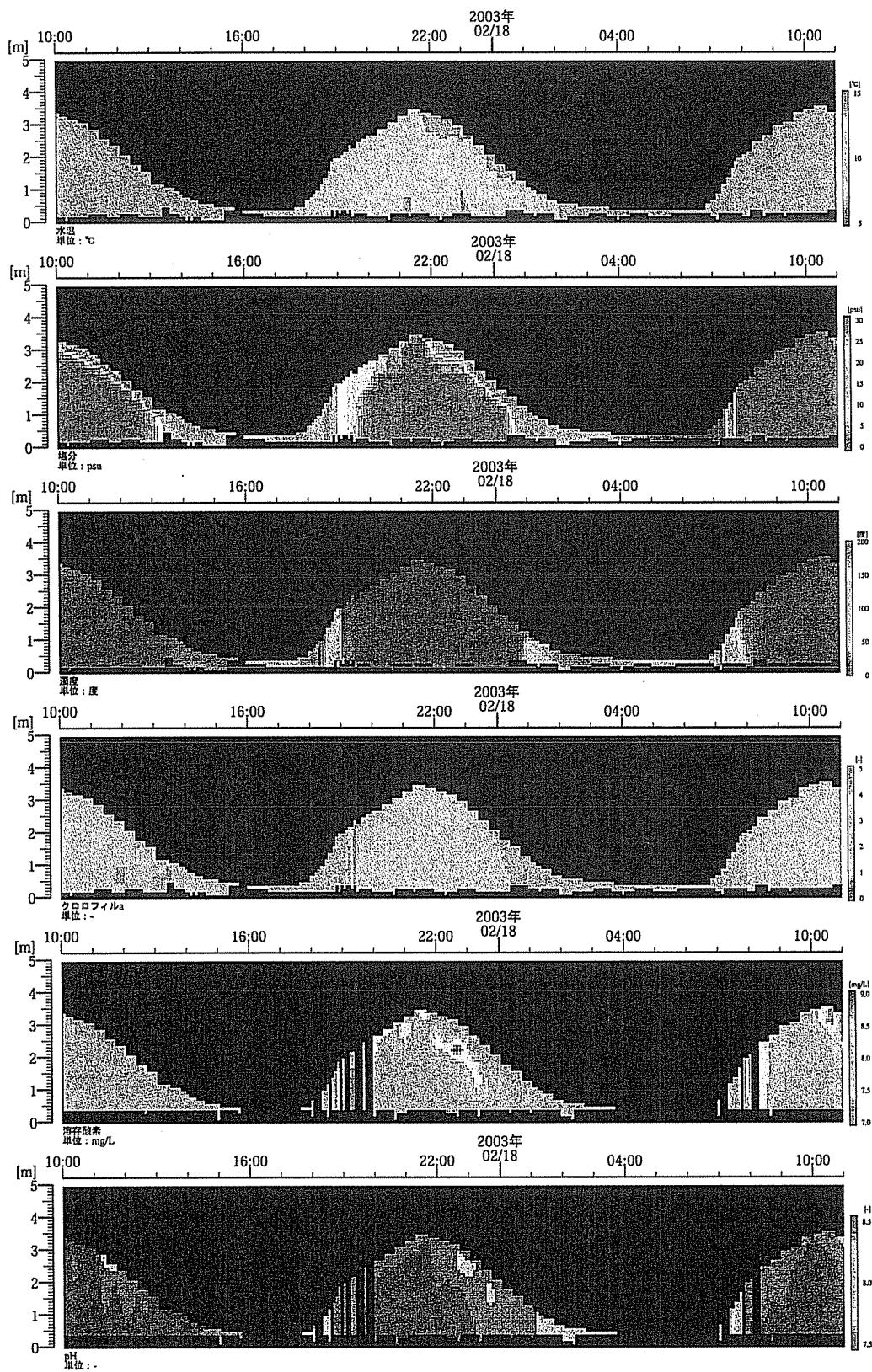


図-4-8 河口における水質の連続測定結果 (2003年2月24日, 白川0KP)

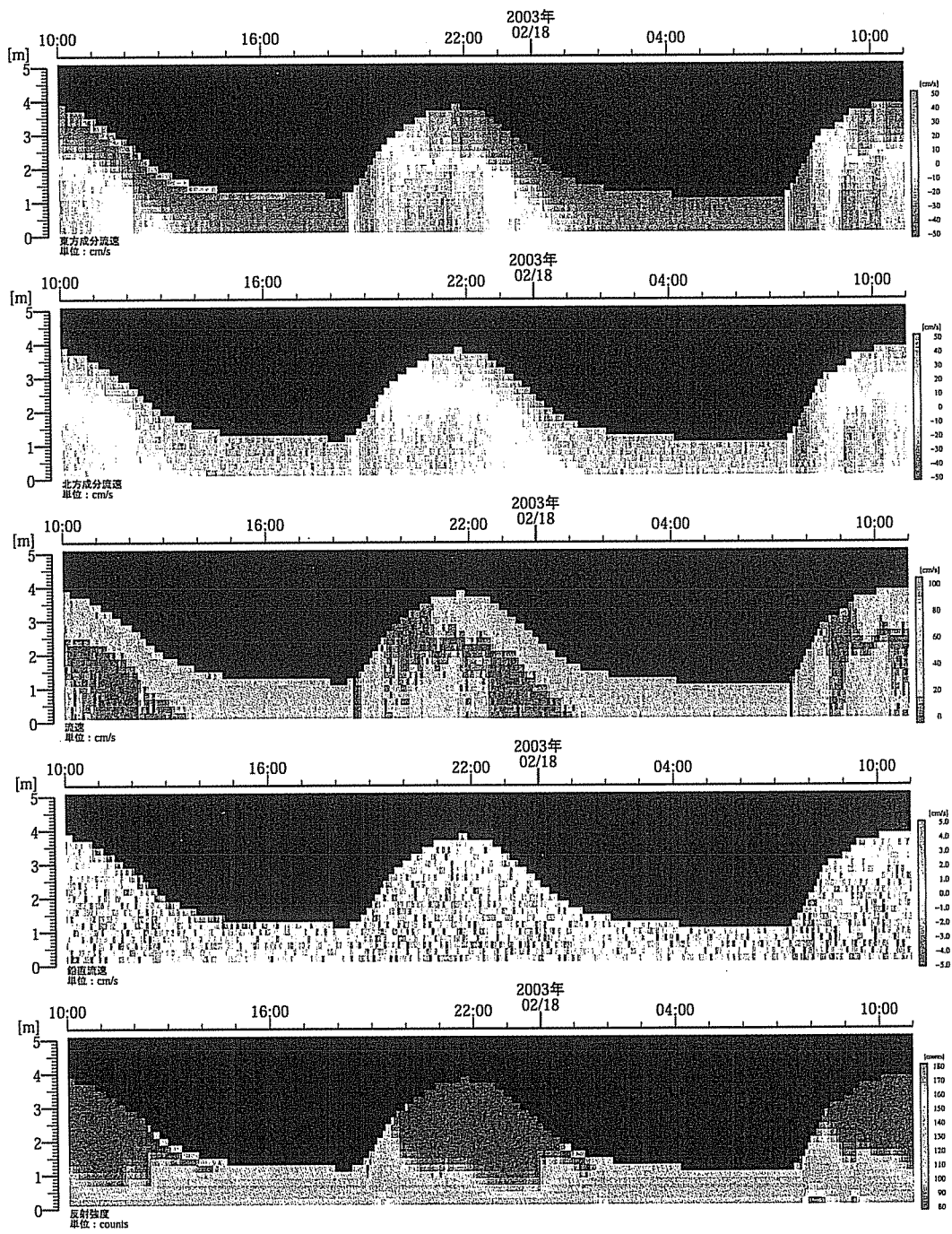


図-4-9 感潮域における流速の観測結果 (2003年2月24日, 白川3KP)

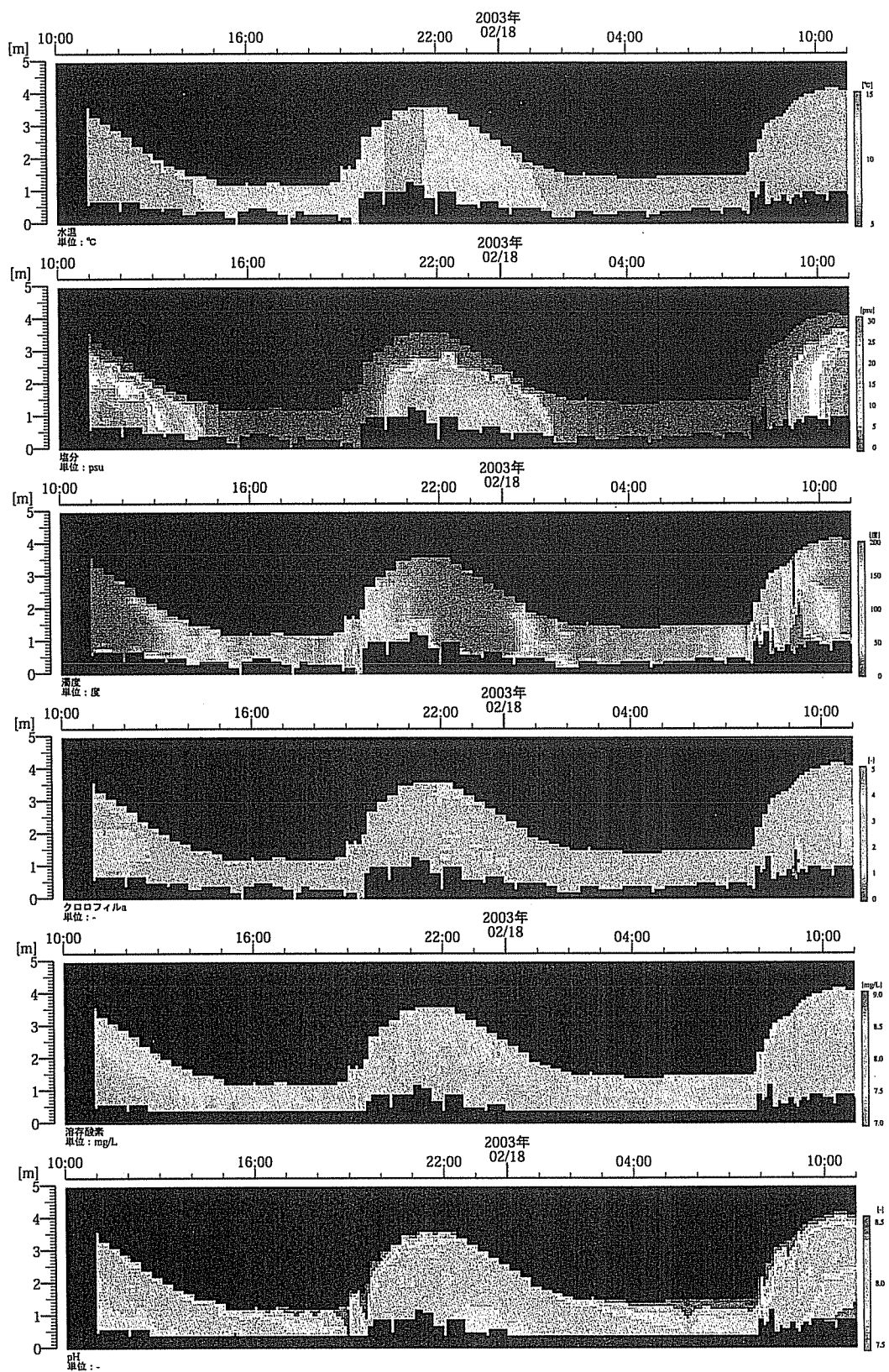


図-4-10 感潮域における水質の連続測定結果 (2003年2月24日, 白川3KP)

(2) 感潮域における平水時の土砂収支と河川流量の関係

非出水期に感潮区間を流動する土砂のフラックスを河川流量で整理した(図-4-11)。この図-4-11において河道3KPにおける近似直線の傾きが0KPにおける近似直線の傾きよりも大であることは、0KPから3KPまでの区間にシルト・粘土が常に堆積する傾向があり、かつ土砂の遡上量および区間内の堆積量は河川流量が小さくなると多くなる傾向にあることを示している。

平水時においては月間流出水量が増加すると、河川から海域へ流出する土砂量は増える傾向にあることがわかる。逆に流量の減少に伴い、海域からの土砂の遡上の傾向が相対的に強まって、土砂が逆流する傾向が強くなる。平水時の河川流量が減少すると、海域から逆流する土砂量も増加し、流下方向の土砂フラックスが減少するために感潮域における土砂の堆積量が増加する。

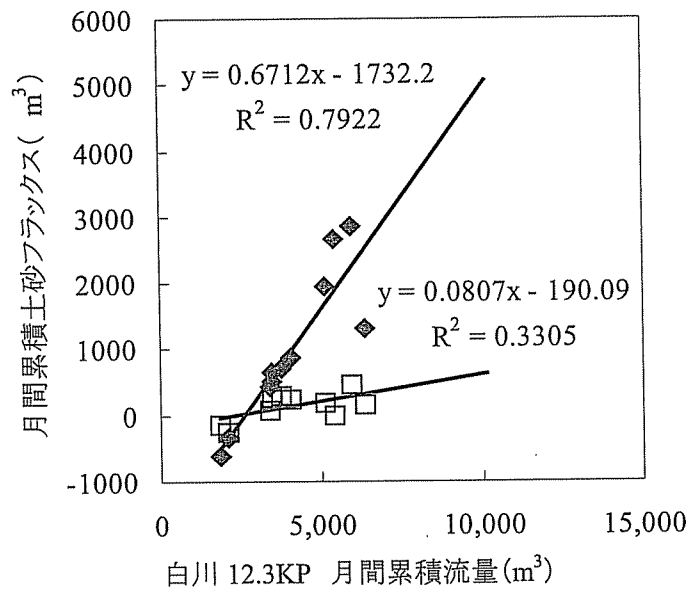


図-4-11 感潮域における土砂収支(◆: 3KP, □: 0KP)と代継橋における月間流出水量の関係, 2002年3月~2003年2月

4-6 河川感潮域で流動する栄養塩の流動特性

(1) 感潮域におけるリン濃度の推定方法

懸濁態リンについては超音波流速計の反射強度から、濃度が推定可能であり、(図-4-1-2). 超音波流速計によって河口域における PP の鉛直 2 次元の負荷流動状況を推定することが可能であった。

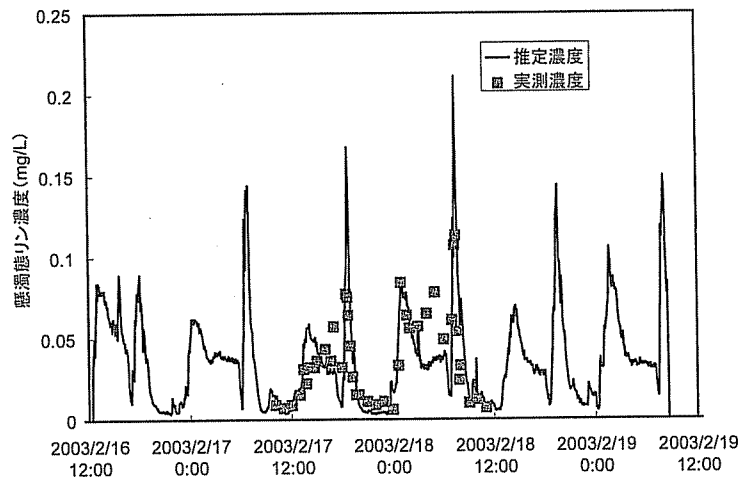


図-4-1-2 超音波流速計の音響強度から推定した懸濁態リン濃度の推定値(—)と実測値(■)

DP (溶存態リン) 濃度は濃度変化が PP よりも小さく、塩化物イオンと良い相関を示す(図-4-1-3)ので、各地点における塩分と DP 濃度の相関式を作成後、各観測地点に設置した自記水温塩分計の塩分データを用いて各地点における DP 濃度の時系列変化を推定した。

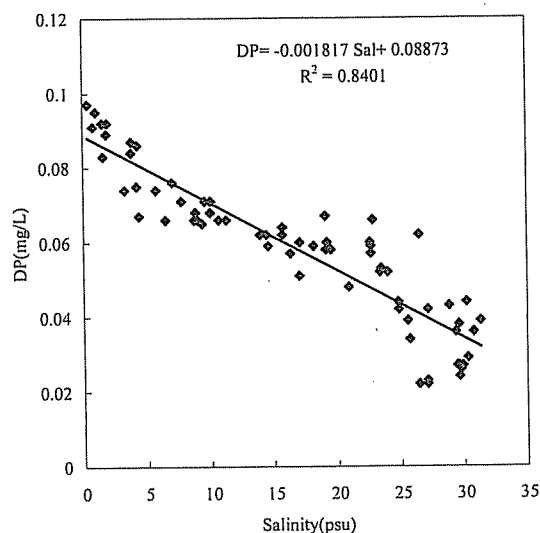


図-4-1-3 塩分と溶存態リン濃度の関係 (白川 OKP, 2003 年 2 月 17 日~18 日)

(2) リンの移流フラックスの算出結果

以上、超音波流速計、塩分計を用いて平水時（流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ ）の大潮（潮位差 4m 程度）の条件で白川 0KP～3KP の区間のリン流動量を、実測値をもとに計算した。その結果、PP フラックスは 3KP 地点で下流方向に $32.5\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ であるのに対して河口 0KP 地点では下流方向に $3.1\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ となり、3KP と 0KP の間に PP が $29.4\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ の割合で堆積すると算出された。3KP と 0KP の区間（ 0.479km^2 ）の河床に均一に堆積した場合 $63\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ で PP が堆積する計算になる。また、DP フラックスは 3KP 地点で下流方向に $66.2\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ であるのに対して 0KP 地点では下流方向に $70.5\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ となった。すなわち $4.3\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ の DP フラックスの増加が起きていた。図-4-14 にフラックスの計算結果をまとめた。

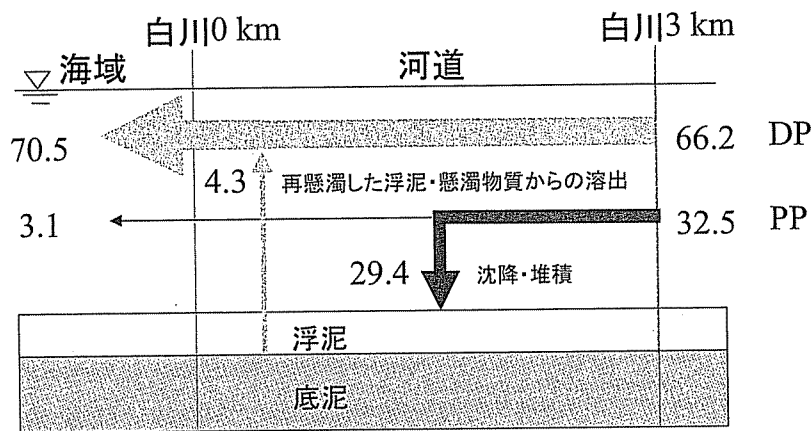


図-4-14 感潮域におけるリンの収支 (kg/day), 2003年2月16-19日

(3) 底質の巻き上げによるリン溶出量

セディメントトラップ内に捕集された内容物は、水塊の流動により底泥が巻き上がって懸濁し再び沈降したものと、新たに外部（上流や海域）から流入した SS の合計量を示していると考えられる。SS の捕集量は、0 KP 地点で $154\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、3 KP 地点では $330\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ であった。セディメントトラップ中に捕集された PP は 0KP 地点では $57.9\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、3 KP 地点で $420\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ であり、区間平均では $239\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ であった。このうち、(2) における検討より、セディメントトラップに捕集された SS は PP のうち、 $63\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ は外部から流入した PP であるので、区間平均で $176\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ に相当する量が河床から一時的に巻き上がった懸濁物質に由来する PP であると推定された。0 KP, 1 KP, 2 KP, 3 KP 地点の表層底泥に含有される DP 濃度は PP 濃度に対して (4.15) 式で表される関係が認められた。

$$DP = 0.147PP \quad (4.15)$$

よって、セディメントトラップの捕集量 (PP 負荷量ベース) から、巻き上げられた底泥に由来する DP の放出量は区間平均で $26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ と求められた。区間全体の面積 (0.479 km^2) では $12.5 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1}$ となった。現地では底泥の巻き上げ・区間外部から流入する懸濁物質が海水と接触することによって間隙水中、懸濁物質中のリンが水中に溶出し、下流域 (海域) への負荷となっていることが明らかになった。前節より、新たに堆積した PP (外部負荷) が $29.4 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1}$ であることから、現在の底質が巻きあがって再懸濁した PP (内部負荷) は区間全体で $100 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1}$ 程度とみられる。すなわち、セディメントトラップ中に捕集された PP のうち 77% 程度は区間の内部で巻きあがった PP であったと推定された。

(4) 底質からのリン溶出量

感潮域の底泥のシルト・粘土中には栄養塩が含有されている。図-4-15 に白川 3KP で採取した底質の栄養塩濃度の鉛直分布を示す。溶存態リン濃度は底泥表層 4cm で最高濃度が認められ、溶存態有機リン (DOP) で 23 mg/L 、溶存態反応リンについては 8.7 mg/L となった。底質中には高濃度のリンが蓄積していることがわかる。リンの拡散係数については実測することが困難であるが、流水式試験法で農業排水路の底泥を用いて実験的に求められた例によると $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ である (塩福ら, 1995)。これを用いて下記で定義される溶出フラックス J ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$)

$$J = D \frac{\Delta C}{\Delta z} \quad (4.16)$$

を求めると、底泥表層 2cm について DRP, DOP についてそれぞれ $12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, $13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ となった。巻き上げ溶出とほぼ同程度のリンが濃度勾配によって溶出しているといえる。

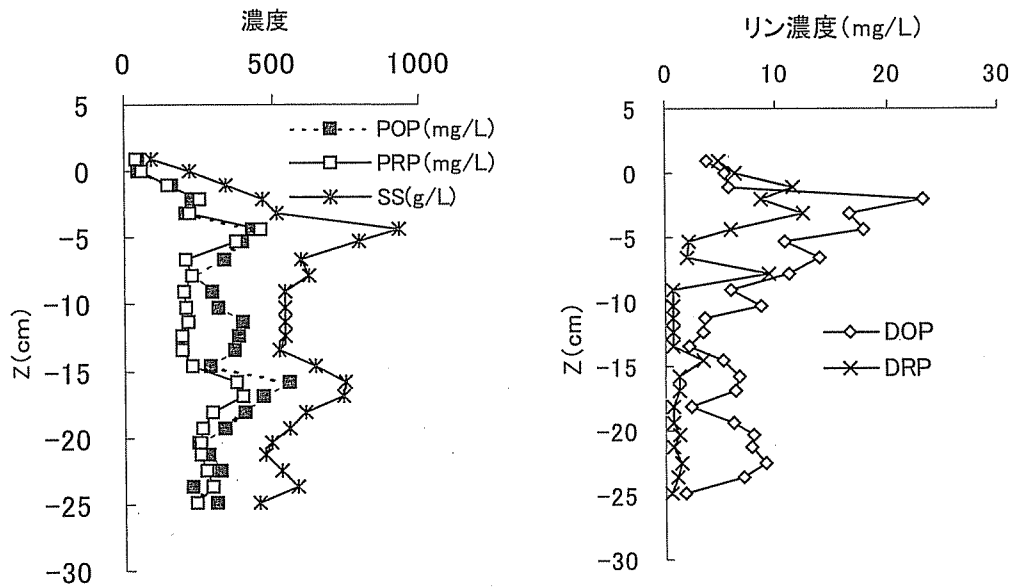


図-4-15 底質中のリン濃度の鉛直プロファイル (白川3KP, 2003年2月19日),
zは鉛直上向きを示す. Z=0cmは目視により判別した底質表面

(5) 出水時の白川感潮域における細粒土砂・栄養塩の収支

出水時には河川感潮域の河岸に堆積したシルト・粘土は流れが強くなると侵食され、流れが弱まると再び堆積すると考えられる。2002年5月15日における出水は代継橋における最大流量が $842 \text{ m}^3/\text{s}$ を記録し、期間Bでは最も規模が大であった。このときの河口域におけるSSの収支を時系列で把握し、侵食量、堆積量を算出した。

出水時にはSS濃度が 500 mg/L 以上となり、超音波流速計の音波は減衰が通常の条件よりも大きくなり、十分なデータが取得できないので音波によるSS濃度の鉛直分布の推定は困難になるから、濁度を解析に用いた。なお、小島橋(3KP付近)にて洪水時における濁度の鉛直濃度分布の観測結果によると、濁度が 500 mg/L を超えるようなときには鉛直分布はほとんど無く、全層一様な濃度であることを確認している(図-4-16)。

解析を行った出水時は中潮であったため、出水前後で塩分の遡上がみられたので、解析期間は底層水が淡水である期間とした。出水にともない塩水が海域に押し出され、St.2の河床上25cmの塩分が初めて 0.5 psu を下回ってから再び塩水が遡上し始めて 0.5 psu を上回る期間とした。St.3とSt.4は hidroグラフの波形を一致させるために必要な80分の時間差を考慮して収支を計算した。図-4-17に白川3KPにおける2002年5月の気象・水文・水質などの状況を示した。なお、St.2においては出水期間中に超音波流速計が土砂により埋没し計測不能となったので、St.2における河川流量は出水期間中に限り、時間遅れ20分でSt.3の流量と等しくすると仮定した。

懸濁態有機炭素および懸濁態栄養塩の収支は次のように計算した。河川上流から供給される懸濁態栄養塩については(4.9)～(4.11)式に基づいて算定した。出水中の河口域における懸濁態栄養塩負荷量収支についてはSSに関する負荷量収支の結果に底質および洪水時懸濁物質の成分含量(洪水時懸濁物質;C:3.3%, N:0.5%, P:0.17%, 底質;C:1.2%, N:0.18%, P:0.096%)を用いて計算した。

すなわち洪水時に侵食される底泥の栄養塩含有量については感潮域の表層底質の栄養塩含有率を用い、懸濁物質が新たに堆積した底泥については洪水中の懸濁物質の栄養塩含有率を用いた。これらの濃度とSSに関する負荷量収支の結果を用いて栄養塩の負荷収支を計算した。

得られた結果を図-4-18に示す。上流から供給された土砂が河口から排出され、感潮域から侵食された底質が流下し、St.2～St.3の区間では侵食された以上の土砂が堆積して、差し引き865tのSS, 71.2tの懸濁態有機炭素, 10.9tの懸濁態窒素, 2.6tの懸濁態リンが当区間に堆積すると求められた。

ところで、出水により供給される懸濁物質中の有機炭素濃度および窒素濃度は出水期から9ヶ月を経過した段階(2月)での感潮域における底泥に含まれる濃度よりも高く、有機炭素含量、窒素含量は洪水時の36%程度と低く、洪水時に感潮域に供給された土砂の有機態窒素成分が底質中の微生物等により利用された結果であるとみられる。このように出水は栄養塩濃度が低下した感潮域底泥の表面を更新し、新たに有機物や栄養塩に富んだ細粒土砂を供給して感潮域の低次生態系を維持する役割を担っているといえる。

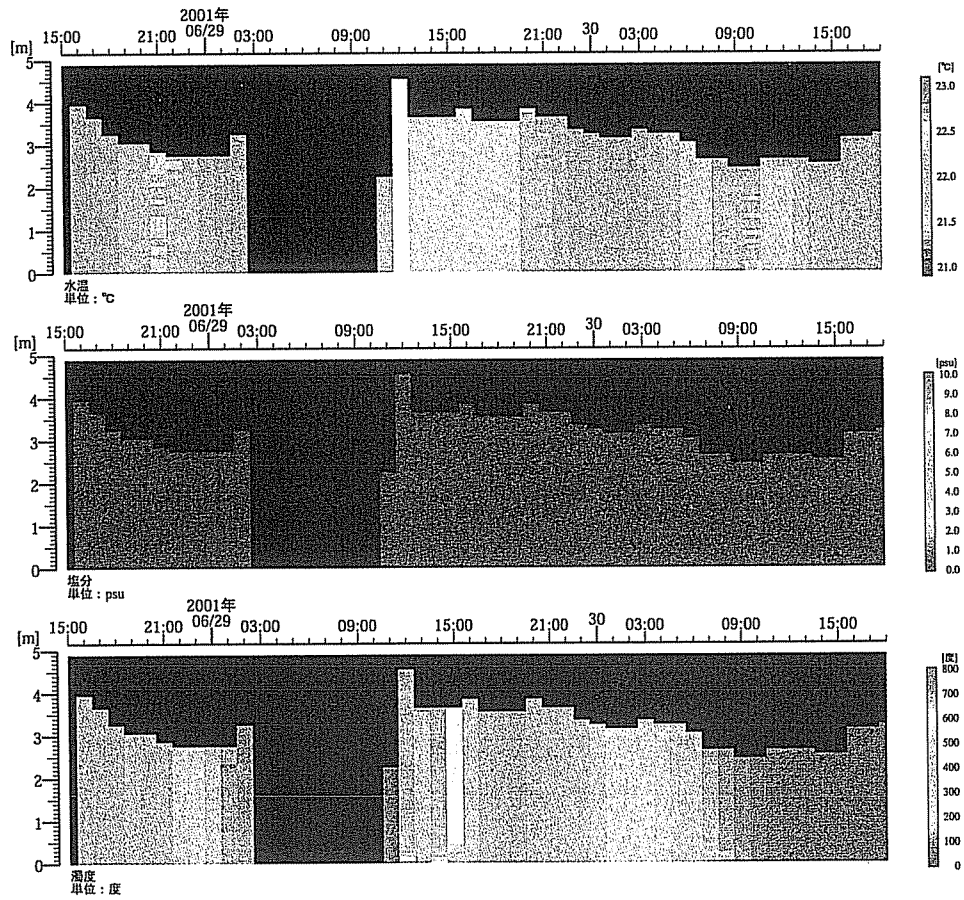


図-4-16 白川感潮河道における出水時の水質イソプレット(2001年6月, 白川3KP, 代継橋におけるピーク流量=1100m³/s)

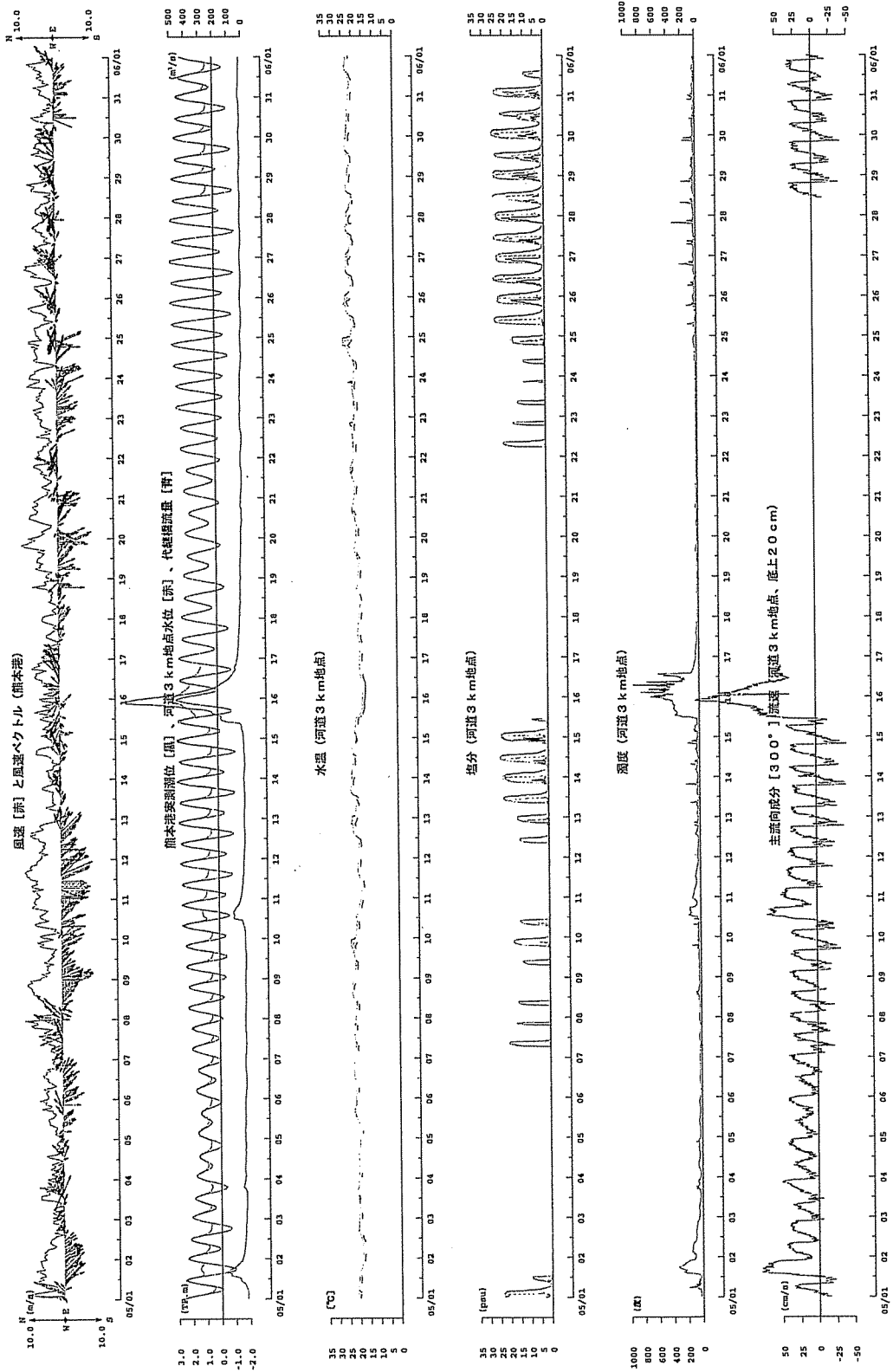


図4-17 白川3KP における気象・水文の状況 (2002年5月)

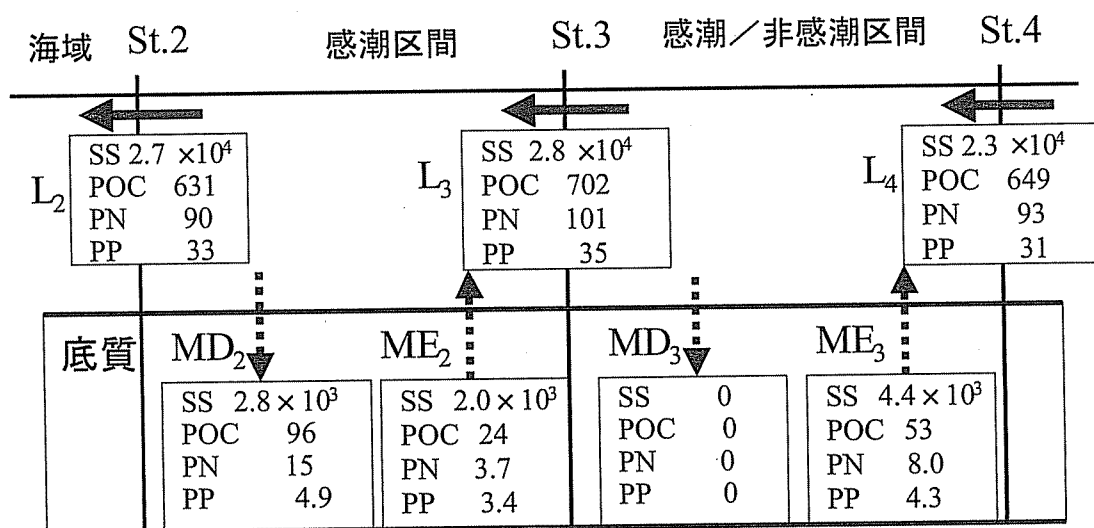


図-4-18 出水時における感潮域の土砂・栄養塩収支 (t) (2002年5月15日~17日)

4-7 河口域における年間の土砂・栄養塩収支

洪水時・平水時を含めた河口域における土砂収支を濁度計、超音波流速計によって求めた。累積土砂流出量を図-4-19に示した。土砂は主に洪水時に供給されており、2002年で年間4.76万tであるが、感潮域では平水時でも土砂の流動が活発であり、St.2から逆流した土砂がSt.2~St.3の区間で土砂が堆積する傾向にある。長期欠測となった5月を除外して計算すると、この区間における年間の土砂堆積量は11ヶ月で1.28万tとなった。すなわち洪水により河口域に供給された流出したシルト・粘土の26.8%が潮汐のはたらきにより河川感潮域の0KP~3KPに堆積することがわかった。同様に面源から流出したPOC, PN, PPの26.8%も感潮域に堆積したと推定された。土砂収支を基準として計算すると、感潮域に堆積した窒素の65%は溶出・脱窒、リンの48%は河口域で溶出したとみられる。これは、底質の窒素含量およびリン含量は面源から流出した懸濁土砂(平均窒素含量C:3.3%, N:0.50%, P:0.17%)に比較して低いためである。

土砂・栄養塩負荷量の算出結果を表-4-4に示す。面源からの流出負荷については降水量の影響が大きいため2期間について見積もった。期間Aは2001年5月10日-2002年5月9日、期間Bは2002年3月1日-2003年2月28日である。白川下流域における下水処理場2箇所の栄養塩負荷および感潮域(0KP-3KP)での土砂堆積・溶出については洪水時に超音波流速計が埋没したために期間Bの5月を除く11ヶ月について計算した。

SS負荷は非点源からの流出によるものが98~99%を占めるが、栄養塩負荷量については全窒素負荷量で25~34%、全リン負荷量で19~30%が下水処理水によるものであること

がわかる。熊本市の下水道普及率は80.4%であるが、処理方法は標準活性汚泥法であるために、栄養塩を除去することは困難である。下水処理によって窒素はその77%が無機態で排出される。リンについては形態別のデータは得られなかったが、そのほとんどが溶存態であるとみられる。白川河口域に供給される栄養塩負荷は全体の6割以上が流域から河川を通じて洪水時等に流出するが、下水処理による寄与は3割に達し、そのほとんどが溶存態栄養塩であるため河口域の一次生産に与える環境に与える影響も大きいといえる。

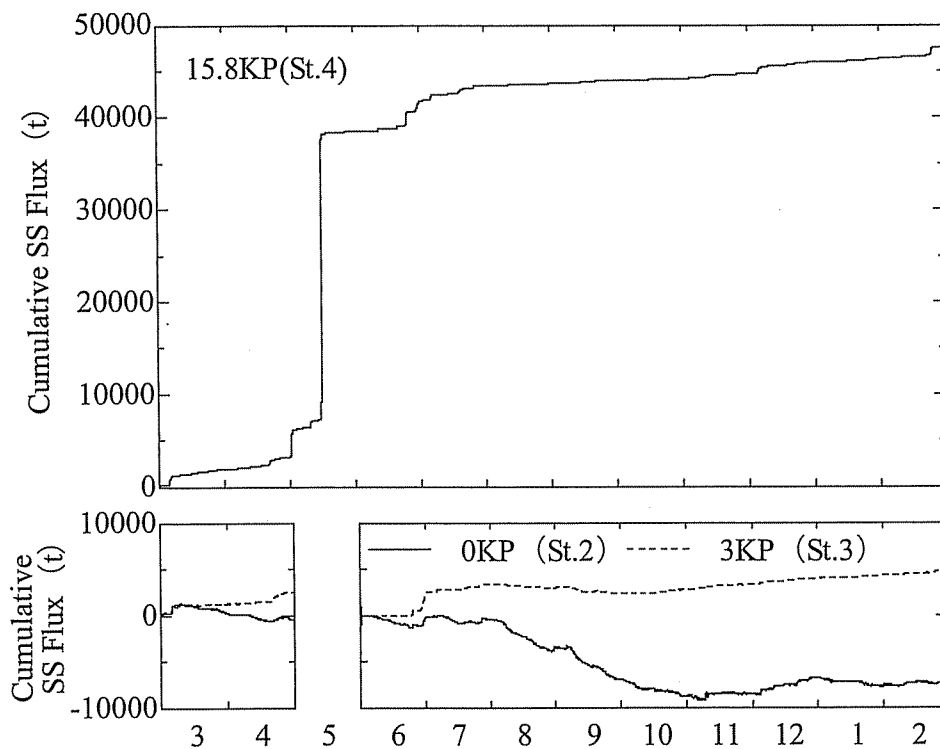


図-4-19 上流域・感潮域における累積SSフラックス(2002年~2003年, 白川)

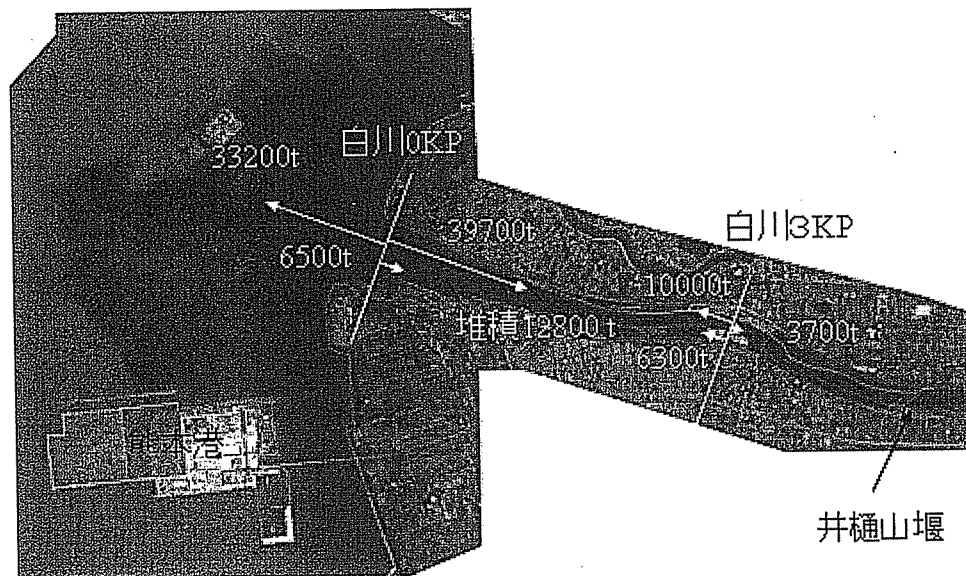


図 4-20 白川における非出水期の年間土砂移動量 (2002年3月～2003年2月；ただし2002年5月は出水期のため除く)

表-4-4 面源，下水処理場からの土砂・栄養塩負荷流出量および感潮域における土砂・栄養塩の流動量 (×100t)

	SS	POC	PN	DN	PP	DP
(面源からの流出負荷量)						
期間 A	1024	33	4.8	8.2	1.55	0.35
期間 B	476	16	2.4	6.6	0.80	0.26
(下流域の下水処理場からの流出負荷量)						
期間 B	9.3	1.4	0.4	3.4	0.04	0.40
(感潮域への堆積)						
期間 B	128	1.6	0.23		0.11	
(感潮域底質からの溶出)						
期間 B				0.42		0.10

期間 A: 2001年5月10日～2002年5月9日

期間 B: 2002年3月1日～2003年2月28日

4-8 河口域の地形変化と底質の変化

河口干潟の地形・底質の変化はその上に生息する生物の生息条件を直接規定するので、その変動特性の解明が求められている。干潟の地形・底質に影響を与えるのは河川からの土砂供給や漂砂、泥分の流動であるため、地形変化と土砂収支は表裏一体の関係にある。地形変化を捉えるための海底地形の計測には一般に音響測深機を用いるが、シルト・粘土の乾燥密度 (0.5 t/m^3 前後) の十分の一程度の密度である「浮泥」 (0.050 t/m^3 程度) が底質表面を覆うと、見かけの体積は 10 倍となるため正確な土砂収支を評価することは困難であった。そこで底質にシルト・粘土が含有された状態での底質の粒径別の土砂収支を求める方法を考案した。概念図を図-4-2 1 および図-4-2 2 に示す。これを白川における土砂収支に適用し干潟地形・底質の変動特性について検討した。

白川河口干潟においては干潟部の底質は粒径が $75 \mu\text{m}$ 以下のシルト・粘土と $300 \mu\text{m}$ 程度の細砂から構成されている。干潟面の大半は砂干潟であるが、流れの弱いところや沖合にはシルト・粘土質が分布している。

底質調査・地形測量は 2003 年 6 月、8 月、10 月に行った。底質はダイバーが直接採取し、底泥表層 10cm を水中で 600ml のポリエチレンパックに密封した。濁度観測は 2001 年 5 月から 2003 年 12 月まで、感潮域における懸濁物質フラックス計測は 2002 年 3 月から 2003 年 2 月まで行った。2003 年については白川の最大流量は 7 月 12 日に記録されており、2003 年 6 月と 2003 年 8 月の調査により当該出水の影響を把握することができた。

出水前後の底質の粒径 (50%粒径) の変化を図-4-2 3 に示した。出水前の河口テラス頂置面は細砂および粗砂が主成分であったが、出水後に底置面および沖合 2km 以遠の北側頂置面に一様にシルト・粘土が表層に堆積したことがわかった。河口テラスの北東部頂置面および南東部頂置面は底質の変化が顕著でなく、出水前と同様に砂質であった。また、河口テラスの底置面にあたる沖合 3km、濬筋から北に 1.6km 地点の底質はシルト・粘土で出水前後に変化は無かった。河口に供給された土砂のうち、砂は濬筋や河口テラス頂置面に堆積したことがわかったが、沖合の底置面に直接堆積したかどうかは表層部がシルト・粘土質であるので不明であった。

砂は主に頂置面の岸側と濬筋の先端部および前置斜面に堆積する傾向があり、岸に近い干潟は侵食傾向にあった。河川の出水によって砂が岸寄りの干潟や濬筋に供給されるが、漂砂によって沖合へ流送されたことを示している。非出水期である 2003 年 7 月から 10 月にかけては粗粒化が進んだ。なお、干潟の北西部にはアサリ漁場が存在しているため貝殻片の混入があり局所的に 50%粒径が大きい地点があった。非出水期については地形・底質の変化が明瞭ではなかったため、地形測量からは土砂移動量を推定することはできなかった。

地形変化量を基に堆積土砂量を算出するためには底泥表面の乾燥密度を直接測定して底質の堆積厚から重量に換算することが合理的である。また、地形変化を算出する対象の底

るための算出方法を考案した。シルト・粘土の重量比が砂の空隙率 λ 以下の場合、砂の空隙の中にシルト・粘土が混入していると考えて砂分の重量を基準とし、(1)、(2)式で算出した。

$$M_C = \rho_s S \Delta h (1 - \lambda) \quad (1)$$

$$M_F = \rho_s S \Delta h (1 - \lambda) \alpha / (1 - \alpha) \quad (2)$$

一方、底質中のシルト・粘土の割合が砂の空隙率 λ 以上の場合にはシルト・粘土の中に砂分が混入していることになるので、シルト・粘土分の乾燥密度を基準とし、(3)、(4)式で算出した。

$$M_C = C_F S \Delta h (1 - \alpha) / \alpha \quad (3)$$

$$M_F = C_F S \Delta h \quad (4)$$

ここで M_C ：対象面積における砂分(75 μ m以上)の変動重量(t)、 M_F ：対象面積におけるシルト・粘土分(75 μ m以下)の変動重量(t)、 S ：対象領域の面積(m²)、 Δh ：地形変化高(m)、 λ ：底質からシルト・粘土成分を除いたときの空隙率(-)、 α ：全重量に占めるシルト・粘土の重量割合(-)、 ρ_s ：単粒子の密度(t/m³)、 C_F ：シルト・粘土分の乾燥密度(t/m³)として計算した。なお本研究では既往の研究から $\rho_s = 2.65$ t/m³、 $\lambda = 0.3$ として計算した。

土砂収支の算出結果を表-4-5に示す。白川上流域からのシルト・粘土成分の供給量は4.7万t~7.2万tであった。出水前後の地形・底質変化が観測された2003年6月~8月について、河口域へのシルト・粘土の堆積量を検討したところ、2003年については上流からシルト・粘土7.2万tが流出し、河口テラスに6.4万t、テラス底置面に3.2tが堆積したとみられた。流出したシルト・粘土の重量を2.4万t上回るシルト・粘土の量が堆積したと計算された。誤差により過大評価になっているか、別領域から輸送されてきたシルト・粘土を評価している可能性がある。

平常時の河川感潮域での土砂移動については2002年における感潮域(0KP~3KP)での土砂フラックス計測によって、1.2万tのシルト・粘土が再移動して堆積したと算出された。

シルト・粘土を含んだ底質に関する土砂収支を求める方法を考案し、白川河口干潟に適用したところ、従来よりも河口域の土砂収支を精度良く把握できた。シルト・粘土は沖合の底置面や感潮域へ輸送されることが明らかになった。砂分は河川の出水時に河口干潟へ供給されているが、漂砂によって沖合に輸送されていた。

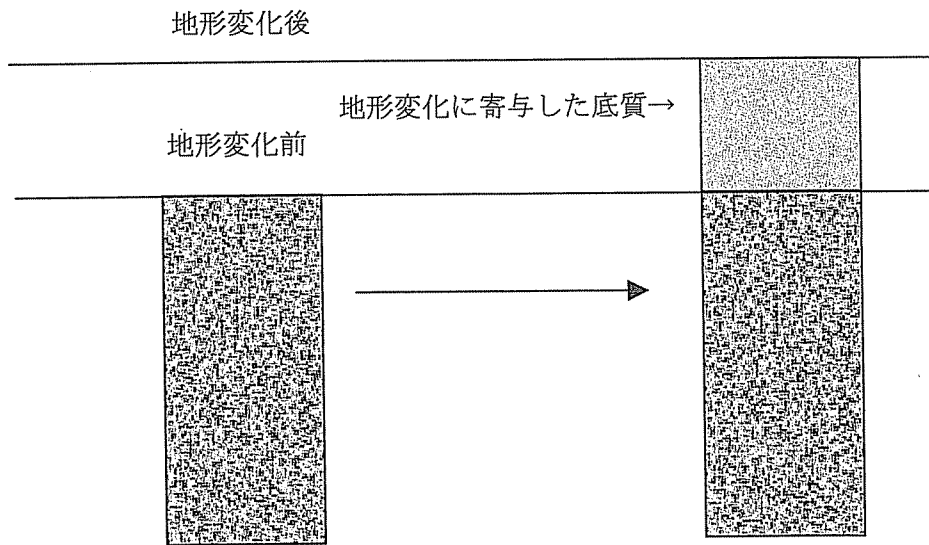


図-4-21 地形変化と底質の堆積状況の考え方

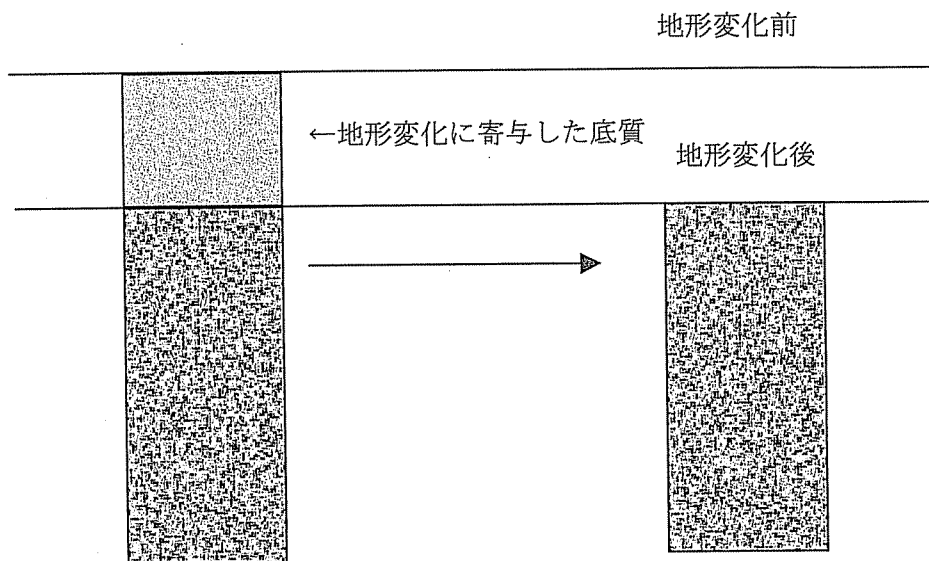


図-4-22 地形変化と底質の侵食状況の考え方

以上より、洪水により河口テラスに供給された土砂のうち、砂分は堆積してテラスの地形変化に寄与するが、シルト・粘土成分は河口テラス部に一旦堆積するものの、時間の経過とともに底質から抜け出して別の場所に移動することが分かった。非出水期には波浪・潮流などの影響によりシルト・粘土は巻き上げられて河口テラスより沖合の底置部に堆積するか、感潮河道に遡上していることが予想される。

表-4-5 白川河口域における粒径別土砂収支 (単位: 万 t)

区域	河川	河川感潮域	河口テラス		テラス底置面	
区間	河川 16KP	河川 0KP~ 3KP	沖合 0km~沖合 3km		沖合 3km~沖合 3.5km	
面積		0.479km ²	8.466km ²		1.609km ²	
項目	通過量	堆積量	堆積量		堆積量	
粒径	シルト・粘 土	シルト・粘土	シルト・粘 土	砂	シルト・粘 土	砂
2002年	4.7	1.2				
2003年	7.2		6.4	6.4	3.2	3.6

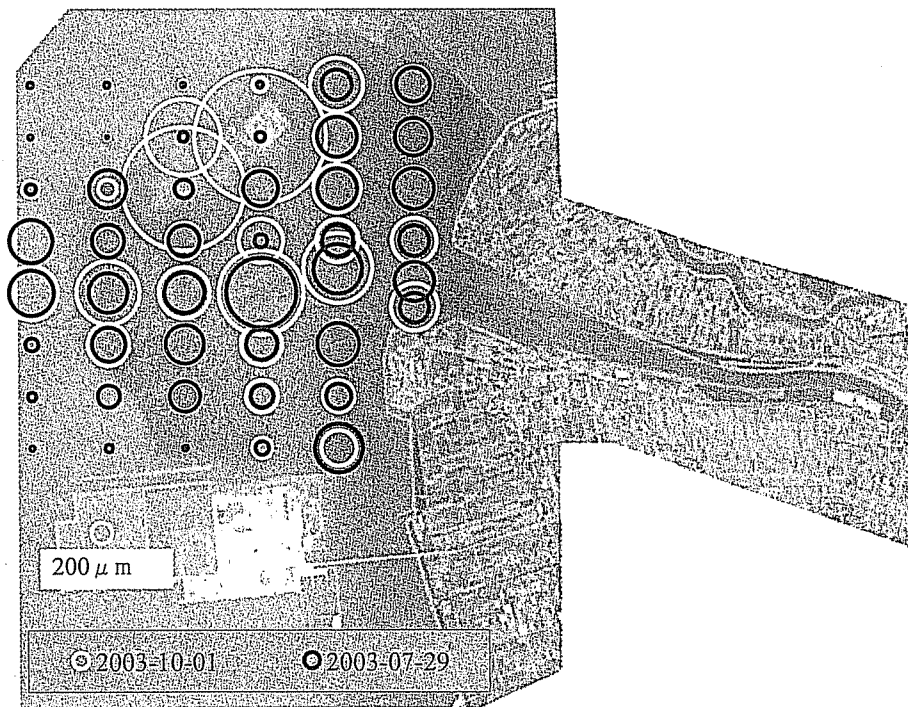
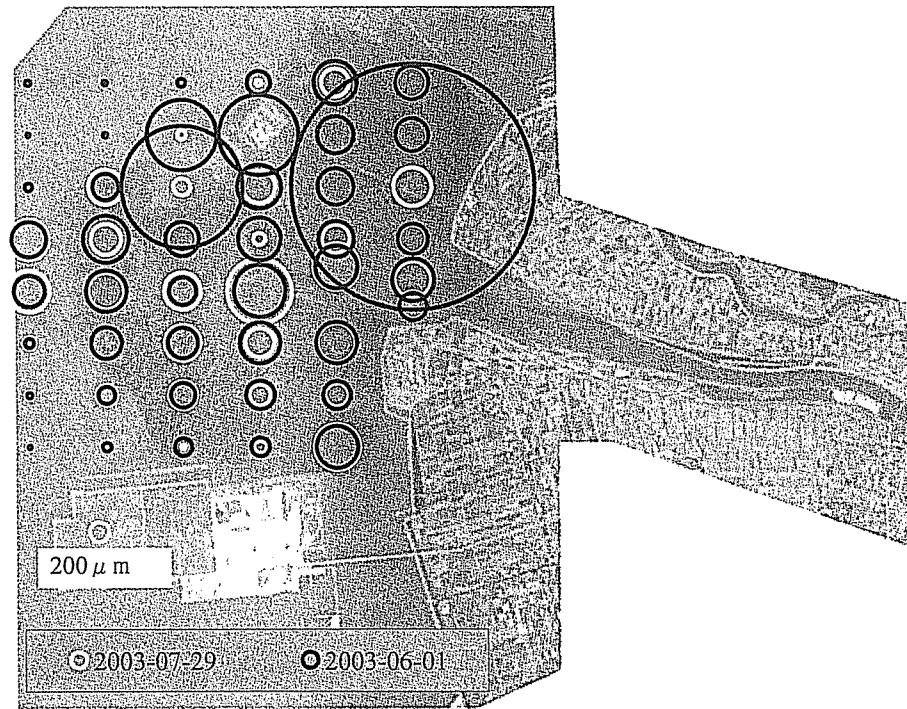


図-4-23 白川河口域における底質の変化
(上：出水期前及び出水期，下：出水期後)

4-9 まとめ

強混合河川に分類される白川河口域の土砂動態を明らかにすることを目的として河口部に観測機器を設置し、長期モニタリングおよび河口部での集中観測、底質調査、深淺測量を実施した結果、河口部の土砂動態について以下が明らかになった。

(1) 出水期に2001年は10.2万tの、2002年では4.76万tの土砂(シルト・粘土)が上流域から感潮域に供給された。河口域に供給される土砂は洪水による供給が大である。

(2) 栄養塩も出水による供給が大きく、大きな出水のあった2001年についてはPOC:3300t, PN:480t, DN:820t, PP:155t, DP:35tと推計されたのに対し、出水の規模が小さかった2002年についてはPOC:1600t, PN:240t, DN:660t, PP:80t, DP:26tとなった。

(3) 2002年の非出水期11ヶ月には累計7.29万tのシルト・粘土が河口を流動し、河口0kmから河道3kmまでの区間に約1.28万tのシルト・粘土が堆積した。平水時においては月間流出水量が増加すると、河川から海域へ流出する土砂量は増える傾向にあることがわかった。流量の減少に伴い、海域からの土砂の遡上の傾向が相対的に強まって、土砂が逆流する傾向が強くなる。平水時の河川流量が減少すると、海域から逆流する土砂量も増加し、流下方向の土砂フラックスが減少するために感潮域における土砂の堆積量が増加する。

(4) 洪水により河口テラスに供給された土砂のうち、砂分は堆積してテラスの地形変化に寄与するが、シルト・粘土成分は河口テラス部に一旦堆積するものの、時間の経過とともに後底質から抜け出して別の場所に移動することが分かった。非出水期には波浪・潮流などの影響によりシルト・粘土は巻き上げられて河口テラスより沖合の底置部に堆積するか、感潮河道に遡上していることが予想される。

<参考文献>

宇野誠高・横山勝英・森下和志・高島創太郎・大角武志(2002): 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.

塩福ほか(1995): 流水式溶出試験法による底質からの溶出速度の推定について, 平成7年度農業土木学会講演要旨集.

末次忠司・藤田光一・諏訪義雄・横山勝英(2002): 沖積河川の河口域における土砂動態と地形・底質変化に関する研究, 国土交通省国土技術政策総合研究所資料, No.32.

横山勝英・宇野誠高・森下和志・河野史郎(2002): 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, pp1486-1490.

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.