

河川感潮域における懸濁物質の観測

伊 福 誠*・合田宏隆**・中田正人***

河川感潮域における懸濁物質の体積濃度は、縦断方向流速の向きが逆転する位相付近において急激に増大し、下流向き流速が最大となる位相でほぼ一様な値になる。この体積濃度の増大は、観測点の下流側に存在していた懸濁物質あるいは上流側で凝集した懸濁物質の輸送によるものである。全体積濃度が高い位相における粒径別体積濃度は、ほぼ $200\sim 460\ \mu\text{m}$ の体積濃度が非常に高いが、これは、高潮時の位相における凝集作用に起因する。次に、 $20\ \mu\text{m}$ 以下の体積濃度が高く、 $30\sim 150\ \mu\text{m}$ の体積濃度は極めて低い。これは、この範囲の粒径の懸濁物質が凝集作用に深く関わっていること、あるいは shear の増大による懸濁物質の分裂を示唆するものである。

1. はじめに

河川感潮域では、懸濁粒子の凝集が生じやすいことは経験的によく知られているが、その理由については未だ完全には究明されていない。従来は、固体粒子の表面にマイナスの電荷があって粒子相互間に反発力が働くが、海水中の陽イオンによってマイナスの電荷が中和されると、粒子同士がファン・デル・ワールス力で吸着しやすくなると説明されてきた。しかしながら、近年、粒子の表面に吸着される特殊な物質の生化学的結合作用による効果が大きいことが明らかにされつつある（例えば、Leussen, 1988）。

河川感潮域における懸濁粒子の分布に関する特徴的な一つは、高濁度水塊（Turbidity Maximum）と呼ばれる高濁度の領域が塩水遡上の上限近傍に出現することである。

河川感潮域における濁度分布の時・空間的变化や底質の沈降・堆積、再浮遊過程については、とくにヨーロッパを中心として現地観測的研究が行われてきた。その一つがドイツ西北部の北海に注ぐウェーザー川の下流域で MASEX (Mud And Suspended sediment EXperiment) と名付けられた定点観測と航走観測からなる大規模な観測であり、1983 年と 1985 年に河口から約 60 km の範囲にわたって行われた。その結果から、緩混合型の混合形態では高濁度水塊は潮汐の干満に伴って河口から 8~12 km 付近に出現し、塩分 6 psu の等塩分線が河床と接する付近を上端にしていることが多いことなどが得られている（Riethmüller ら, 1988）。

一般に、高濁度水塊は塩水の遡上が成層した状態で起こり、鉛直循環流の生ずる弱混合あるいは緩混合型の混合形態を呈する感潮河川に出現する 경우가多く、この水域では懸濁物質の沈降作用によって急激な堆積が進むことが多い。また、この水域に集まる懸濁物質は、上流か

ら輸送されるもの、上層から下層に沈降するもの、海水の遡上とともに輸送されてきたものなどが混在している。このような懸濁物質の集中やそれに伴う急激な堆積の進行は、河床の地形変化を生じさせるのみでなく、最近では河川流域での水質汚濁を反映し、汚染物質の集積を引き起こして水質や底質の劣化をもたらす可能性がある。

わが国では、懸濁物質の凝集・沈降過程は衛生工学の分野で実験を主として精力的に行われてきた（例えば、丹保ら, 1965；楠田ら, 1980, 1982；安立, 1982）。しかしながら、河川感潮域での現地観測は、採水分析による多点計測の時・空間精度の問題や移動速度が速いこと等の理由により極めて困難であり、懸濁物質の挙動に関する精緻な資料は極めて少ないのが実状である。

最近、レーザを使用した懸濁物質の粒径と体積濃度を計測可能な機器（レーザ回折式粒度測定器）が開発され、鷲見ら（2001）や佐藤ら（2001）は、それを用いて河道内や河口周辺において観測を実施している。しかしながら、懸濁物質に関する資料は十分とはいえない。

こうしたことから、本研究では河川感潮域においてレーザ回折式粒度測定器を用いて現地観測を行い、懸濁物質の挙動に関する基礎的資料を得ようとしたものである。

2. 観測点および観測機器

（1）観測点および観測点付近の底質

a) 観測点

愛媛県の肱川を観測対象とした。図-1 に示すように、河口から 6 km 上流の観測点で水位、流向・流速、水温、塩分、濁度および懸濁物質の粒度分布を観測した。観測期間は、2001 年 5 月 16 日 19 時~6 月 5 日 14 時である。河川流量は、河口から 12.8 km 上流の五郎水位観測所での観測結果を使用した。なお、潮位は、アプリケーションソフト“潮時表”（酒巻, 1996）による肱川河口に位置する喜多郡長浜町における推算値を用いた。

図-2 は、観測点付近の河道形態と河口から 5.8, 6 お

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科
** 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科
*** (株)エイトコンサルタント技術開発部

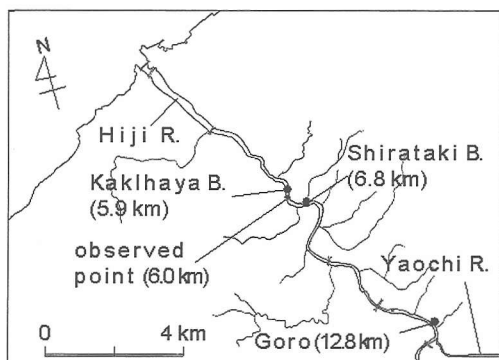


図-1 肱川における観測点

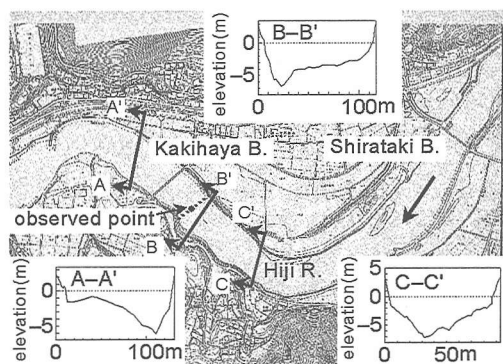


図-2 観測点付近の河道形態と横断形状

よび6.2 kmの横断形状を示す。観測点の下流側約300 mと上流側約200 m付近で河道は蛇行している。河口より5.8 km (A-A') では右岸側に滞が存在する。また、6 km (B-B') では左岸側に滞が存在し比較的幅の広いマウンドが形成されている。また、6.2 km (C-C') では滞は河道のほぼ中央に存在する。

図-3は、観測点の横断形状を示したものである。なお、この断面は図-2. 中の破線に相当する。右岸にある6 kmの距離標 (T.P.+4.6 m) より左岸側に48.67 mの地点に観測機器を設置した。また、観測機器を設置した地点の水深は1.8 mであり、左岸側に存在する滞の水深は3.8 mである。観測点付近の河床形状は複断面である。

b) 観測点付近の底質

図-4は、観測点における底質の粒径加積曲線を示したものである。右岸より10~70 mまでの10 m毎の中央粒径は、それぞれ0.31, 3.38, 1.13, 1.49, 3.43, 4.52 および6.86 mmであり、20 m地点を除けば左岸ほど粒径が大きいことが判る。なお、右岸より48.67 mの観測点付近における底質の中央粒径は1~4 mmの範囲である。

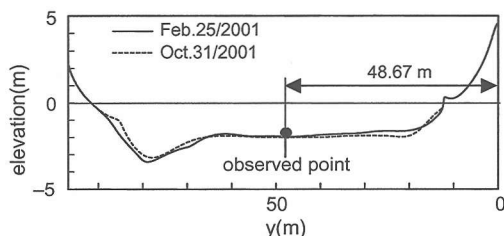


図-3 観測点付近の横断形状

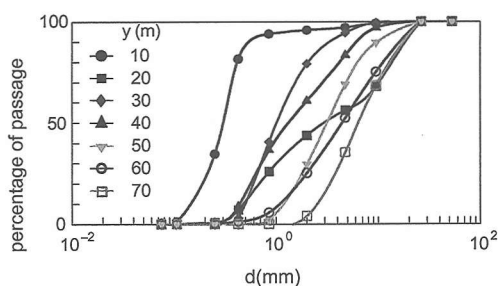


図-4 観測点付近の底質の粒度分布

(2) 観測機器

写真-1は観測に用いた機器である。水位は、流速計に内蔵した水晶発振式の水圧センサで測定した。流速は3成分が測定可能なSontek社製のADV OCEANで測定した。また、水温・塩分および濁度は、それぞれSeabird社製のSBE-37およびD&A Instrument社製のOBS-3で測定した。

さらに、Sequoia Scientific社製のLISST-100で懸濁物質の粒径毎の体積濃度を測定した。LISST-100は、計測エリア内にある微粒子のレーザ光線による回折リングを計測することにより粒径と体積濃度を測定する方式で

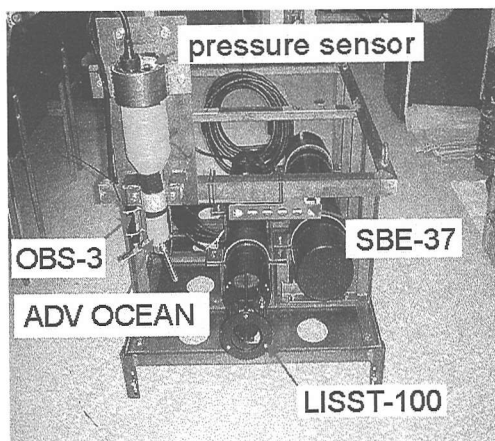


写真-1 観測機器

あり、測定範囲は $2.5 \sim 500 \mu\text{m}$ である。

水位、流速、水温・塩分および濁度のサンプリング周波数は 1 Hz で1分間の平均値を出力した。また、懸濁物質の体積濃度のサンプリング周波数は 1 Hz で16回の平均値を出力した。なお、サンプリング間隔は5分である。

3. 解析結果

図-5は、水位、縦断方向流速、塩分、水温、懸濁物質の体積濃度および長浜港における潮位である。

(1) 水位と流速

観測地点における最高水位は、縦断方向流速が正（以下、上流向き流速と記す）の最大値を示す時刻より2～3時間程度遅れて生じ、最低水位は、縦断方向流速が負（以下、下流向き流速と記す）の最大値を示す時刻より2～6時間程度遅れて生ずる。なお、水位差が大きい場合には、流速振幅は 0.2 m/s 程度であるが、水位差が小さい場合には、流速振幅は 0.07 m/s 程度小さい。

(2) 水 温

水温の変動は、水位の変動とよく対応しているようであり、1日のうちで2通りの変動パターンを示す。まず、6月3日と6月4日の5～10時にかけては、水位が最高となり塩分が最大値を示す時刻に水温は極小値を示す。それ以降、水位の低下とともに水温は徐々に上昇し、縦断方向流速がほぼ 0 m/s となる時刻で小さなピークを示す。それ以降、再び水温は徐々に低下し、下流向き流速が最大となる時刻で最低 (19.4°C) となる。つぎに、下流向き流速が最大となる時刻から水温は徐々に増大し、水位が最低となる時刻でピーク (21.7°C) を示す。これは観測点よりも上流側の比較的高温の河川水の流下によるものであると考え、ピークを示す時刻以降、水位の上昇につれて水温は僅かずつではあるが低下し、塩分が最大となる時刻で極小値 (20.9°C) を示す。その後、水位の低下に伴って急激に水温は上昇し、下流向き流速が最大となる時刻で最大値 (22.4°C) を示す。

(3) 懸濁物質の体積濃度

P1～P5は、各粒径の懸濁物質の体積濃度の総和

(以下、全体積濃度と記す)が比較的大きい時間帯を表している。全体積濃度は、縦断方向流速がほぼ 0 m/s となる時刻より急激に高くなり、その継続時間はほぼ1～2時間程度である。また、下流向き流速が最大となる時刻付近で全体積濃度は急激に低下する。これら懸濁物質の全体積濃度の変動は、観測点付近で凝集作用が活発になったことあるいは観測点より上流側で凝集した懸濁物質が輸送されてきたことによるものと考えられる。さらに、P2およびP5における水温をみると、徐々に上昇し最大値を示す時刻では懸濁物質の全体積濃度も高い値を示す。この全体積濃度の増大が観測点の河床に堆積している微細粒子の pick-up によるものであるとすれば、縦断方向流速の振幅が大きい位相においても高い体積濃度が出現するはずである。すなわち、高い全体積濃度の出現は、観測点付近における凝集作用が活発になったことや観測点の上流側に存在していた懸濁物質あるいは観測点の上流側で凝集・成長した懸濁物質が水位の低下に伴って流下してきたことに起因する。

P3は、上流向き流速がほぼ最大値を示す付近の時間帯である。前述した4つの時間帯はいずれも下げ潮時にあたる。この時間帯における全体積濃度の増大は、観測点の下流側から輸送されてきたものであると考える。その理由としては、この時間帯の約6時間前の下流向き流速振幅が他の3つの位相の下流向き流速振幅よりも小さく、その3時間程度前の塩分も低いことがあげられる。

(4) 水温の変動

図-6は、河口から6 kmの観測点における水位、塩分、水温と5.9および6.8 kmの国土交通省の定点観測所

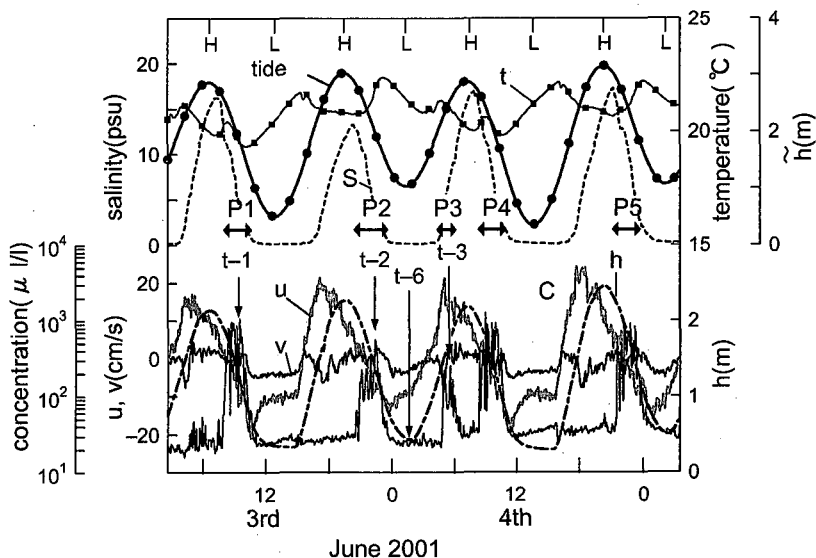


図-5 観測項目の時系列 (6月3～5日)

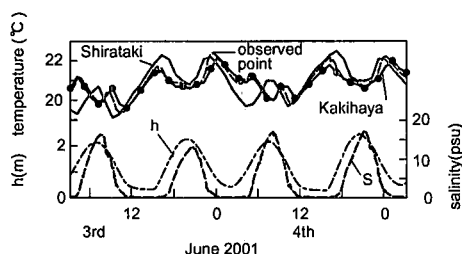


図-6 水温、塩分および水位の時系列

(柿早観測所、白滝観測所)における水温の変化である。なお、上部が水温、下部は水位と塩分である。柿早、白滝観測所および6 kmの観測点における水温は、それぞれ19.6~22.2, 19.3~22.5および19.4~22.4°Cであり、ほぼ同程度である。下げ潮時には、まず白滝観測所でピークが生じ、約20~60分後には柿早観測所と6 kmの観測点に伝播している。なお、その伝播速度は0.2~0.6 m/s程度である。一方、上げ潮時には、柿早観測所と6 kmの観測点にピークが生じ、約35~60分後には白滝観測所に伝播している。なお、その伝播速度は0.2~0.4 m/s程度である。

すなわち、図-5中のP1あるいはP4の時間帯における水温の僅かな上昇・下降は、上流からの河川水の流下に起因するものである。

(5) 粒径別体積濃度

図-7は、図-5中の4つの位相における懸濁物質の粒径と各粒径の懸濁物質の体積濃度を示したものである。粒径2.5~500 μm を対数的に32に分割した階級の体積濃度と階級の中央粒径値で示している。図-5中で懸濁物質の体積濃度が比較的高いt-1およびt-2の位相においては、懸濁物質の粒径がほぼ30~100 μm の体積濃度が比較的低く、63.3 μm の粒径で極小値を示す。また、上流向き流速がほぼ最大となるt-3の位相においては、全体積濃度は200 $\mu\text{l/l}$ 程度であり、t-1の位相のその1/5程度であるが、粒径がほぼ30~100 μm の体積濃度はかなり高い。一方、低潮時の位相、t-4、では、t-3の位相における分布を下方にシフトした分布を示す。t-1とt-2の位相における粒径がほぼ30~100 μm の体積濃度が低いのは、この範囲の懸濁物質が凝集作用に深く関わっており、比較的粒径が大きい懸濁物質と凝集したため、あるいは懸濁物質がshearの増大によって分裂したため等が考えられる。

(6) 粒径群の体積濃度

図-8は、2.7~19.9, 23.5~88.2, 104.1~185.8および219.3~461.9 μm の4つのグループ(以下、G1, G2, G3, G4と記す)の体積濃度とそれらの全体積濃度に対する割合(C_g/C_t)およびレーザの透過光度(L_t)の時系列

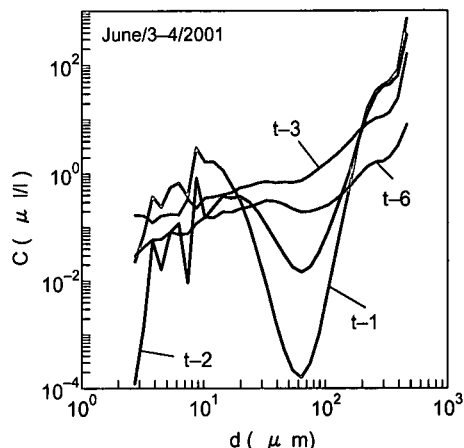


図-7 粒径別体積濃度

を示したものである。なお、図中のP1, P2, P4およびP5は、縦断方向流速がほぼ0となる位相から下流向き流速が徐々に増大する時間帯であり、図-5中のものに相当する。P1, P2, P4およびP5の時間帯においては、G1とG4の体積濃度は急激に増加し、その後徐々に減少する。また、G2の体積濃度は前述したG1とG4とは、負の相関を示す。さらに、G3の体積濃度は一旦減少し、その後急激に増大する。なお、P1, P2, P4およびP5の時間帯においては、レーザの透過光度は急激に減少し、G4の体積濃度が最大となる位相付近においては0.2程度の値を示す。一方、P3は水位の上昇に伴って塩水が遡上する時間帯に相当する。観測点の下流側に存在していた懸濁物質が徐々に上流側に輸送されるため他の4つの時間帯のような体積濃度の増減はなく、G1~G4の体積濃度とも僅かに増大し、その後、徐々に減少する。

G1, G2, G3およびの体積濃度の全体積濃度に対する割合は、それぞれ75~98%, 10%以下, 10%以下および5%以下であり、比較的粒径の大きい懸濁物質の浮遊が顕著

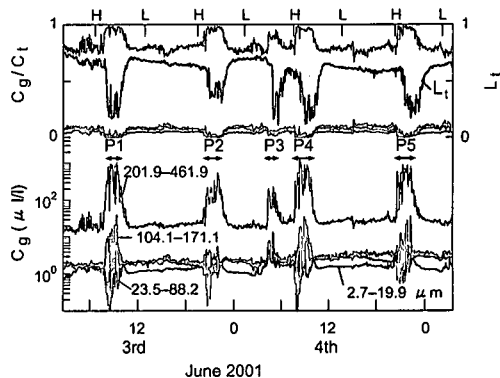


図-8 粒径群の体積濃度の時系列

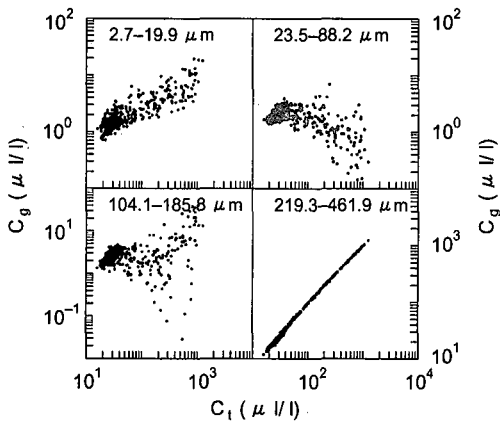


図-9 全体積濃度と粒径群の体積濃度

である。

図-9は、全体積濃度とG1~G4の体積濃度との関係を示す。全体積濃度とG1, G4の体積濃度とは正の相関を示すが、G2とはばらつきはあるものの負の相関を示す。なお、G3の体積濃度は全体積濃度が低い場合には大きな変化はないが、全体積濃度の増大とともにばらつきが大きくなる。

G4の体積濃度が増大するP1, P2, P4およびP5の時間帯ではG2の体積濃度は減少するが、この体積濃度の減少は、観測点の上流側において凝集作用が活発であり、その凝集には23.5~88.2 μm 程度の粒径を持つ懸濁物質が深く関わっているためではないかと考える。

4. おわりに

愛媛県南西部に位置する肱川を対象として、感潮域における水位、流向・流速、水温、塩分、濁度および懸濁物質の粒度分布を現地観測に基づき調べた。得た結果を要約すると以下の通りである。

(1) 水位が最高となる位相付近において、横断方向流速の右岸向き流れが大きくなっているが、これは、左岸側の滞に塩水が遡上してきたために、左岸側と右岸側との混合水の密度差に起因する密度流であると考えられる。

(2) 懸濁物質の体積濃度は、水位がピークとなる位

相付近における塩分の高低が関連している。また、縦断方向流速の向きが逆転する位相付近において急激に増大し、下流向き流速が最大となる位相ではほぼ様な値になる。この体積濃度の増大は、底質のpick-upによるものではなく、観測点の下流側に存在していた懸濁物質あるいは上流側で凝集した懸濁物質の輸送によるものであると考える。

(3) 23.5~88.2 μm 程度の粒径を持つ懸濁物質の体積濃度が低いのは、この範囲の懸濁物質が凝集作用に深く関わっており、比較的粒径が大きい懸濁物質と凝集したため、あるいは懸濁物質がshearの増大によって分裂したため等が考えられる。

謝辞：柿早、白滝および五郎観測所における水位や水温の資料は、国土交通省四国地方整備局大洲工事事務所および山鳥坂ダム工事事務所から提供して頂いた。貴重な資料を快く公表して頂いたことに感謝する。なお、本研究は、河川整備基金の補助を受けて行ったことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 安立重昭 (1982): 塩水中におけるベントナイトのフロック形成について、運輸省港湾技術研究所 技研資料, No. 421, pp. 1-16.
- 楠田哲也・古賀憲一・栗谷陽一 (1978): 塩水中における粘土粒子の凝集、用水と排水, Vol. 20, No. 3, pp. 31-36.
- 楠田哲也・古賀憲一・栗谷陽一 (1980): 汚泥の沈降濃縮に関する研究、土木学会論文報告集, 第294号, pp. 59-71.
- 酒巻輝幸 (1996): 潮時表.
- 佐藤慎司・Harry Yeh・加藤史訓 (2001): 利根川河口周辺沿岸域における浮遊懸濁物質の挙動に関する現地観測、海岸工学論文集, 第48巻(1), pp. 626-630.
- 鷺見栄一・鋤崎俊二 (2001): 沿岸海域の懸濁粒子の粒径分布の現地測定とデトリタス分布、海岸工学論文集, 第48巻(2), pp. 1101-1105.
- 丹保憲二・穂積 準・渡辺義公 (1965): フロック形成過程の基礎的研究、水道協会雑誌, 第372号, pp. 10-19.
- Leussen, W. van (1988): Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs, In J. Dronkers and van Leussen eds, Physical Process in Estuaries, Springer-Verlag, pp. 347-377.
- Riethmüller, R. et al. (1988): Hydrographic Measurement in the turbidity zone of the Weser estuary, In J. Dronkers and van Leussen eds, Physical Process in Estuaries, Springer-Verlag, pp. 332-344.