

肱川感潮域における懸濁物質の挙動

CHARACTERISTICS OF SUSPENDED SOLID IN HIJI RIVER ESTUARY

伊福 誠¹・合田宏隆²・中田正人³

Makoto IFUKU, Hirotaka GOUDA and Masato NAKATA

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

²学生員 愛媛大学大学院理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

³(株) エイトコンサルタント 技術本部 (〒700-8617 岡山市津島京町3-1-21)

The volume concentration of suspended solid in estuary rapidly increases in the phase in which the direction of longitudinal flow velocity reverses, and it takes an almost uniform value in the phase in which the downstream flow velocity is maximal. The increase of volume concentration is caused by the transportation of suspended solid which has been existed at the upstream of the observed point or which has been aggregated near the observed point. In a phase that the total volume concentration is high, the volume concentration of 200~460 μm is very high, and it is induced to the flocculation in high water slack. While, the volume concentration below 20 μm is high, and that of 30~150 μm is very low. It is supposed that suspended solid with above-mentioned diameter may relate to the flocculation or may be destroyed with increasing of velocity gradient.

Key Words : estuary, saline water, suspended solid, flocculation, LISST-100

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。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いことが明らかにされつつある¹⁾。

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・空間的変化や底質の沈降・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場合が多いこと等が得られている²⁾。

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^{3), 4), 5), 6)}。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、佐藤ら⁷⁾ や鷺見ら⁸⁾ 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、河口域における懸濁物質に関する資料の蓄積は、まだまだ十分とは言えない。

こうしたことから、本研究では愛媛県の南西部に位置する一級河川である肱川 (図-1) の感潮域においてレーザ回折式粒度測定器を用いた現地観測を行い、懸濁物質

挙動に関する基礎的資料を得ようとしたものである。

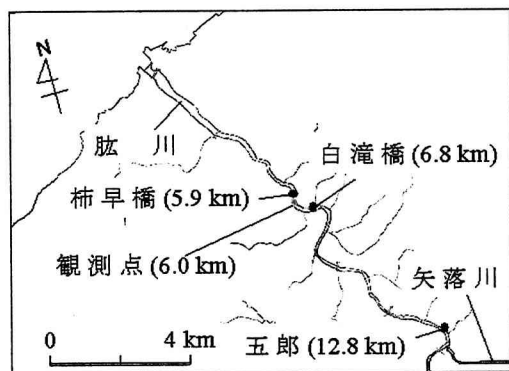


図-1 肱川と観測点

2. 観測点および観測機器

肱川における塩水楔の混合形態は、弱混合～強混合である。

(1) 観測点および観測点付近の底質

a) 観測点

河口から 6 km 上流の観測点で水位、流向・流速、水温、塩分、濁度および懸濁粒子の粒度分布を観測した。

図-2 は、観測点付近の河道形態と河口から 5.8, 6 および 6.2 km の横断面を示す。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')では右岸側に滞りが存在する。また、6 km(B-B')では左岸側に滞り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')では滞りは河道のほぼ中央に存在する。

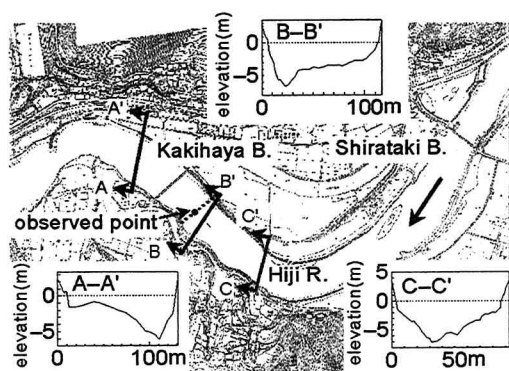


図-2 観測点付近の河道形態と横断形状

図-3 は、観測点付近の横断面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および左岸側に存在する滞りの水深は、それぞれほぼ 1.8 m および 3.5 m である。

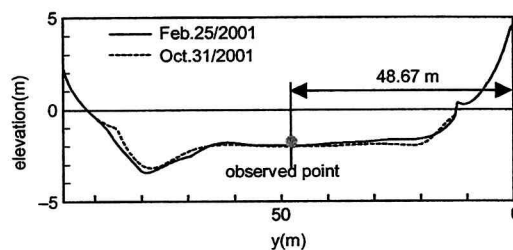


図-3 観測点付近の横断面

b) 観測点付近の底質

図-3 に示す $y=0$ m 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ほぼ 1～4 mm の範囲である。

c) 観測機器

写真-1 は観測に用いた観測機器である。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 で懸濁粒子の粒径別体積濃度を測定した。なお、LISST-100 による懸濁物質の粒径の測定範囲は、2.5～500 μ m である。

水位、流速、水温・塩分および濁度の測定高さは、河床から、それぞれ 0.755m, 0.17m, 0.46m および 0.17m であり、サンプリング周波数は 1 Hz で 1 分間の平均値が出力される。また、懸濁物質の測定高さは河床から 0.17m であり、サンプリング周波数は 1 Hz で 16 回の平均値が出力される。なお、サンプリング間隔は 5 分である。

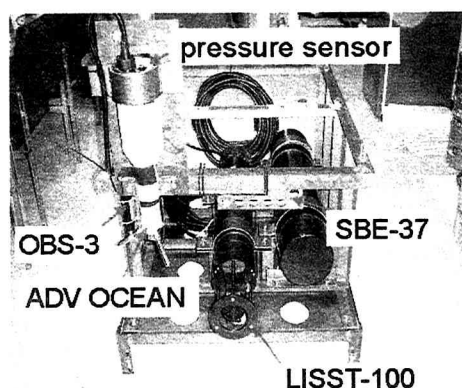


写真-1 観測機器

3. 観測結果の解析

図4は、水位 h 、縦断方向流速 u 、横断方向流速 v 、塩分 S 、水温 t 、懸濁粒子の体積濃度 C および長浜港における潮位 h_t である。なお、この期間は河口より12.8km上流にある五郎観測所での河川固有流量が $10.29 \sim 9.73 \text{ m}^3/\text{s}$ で大きな変化がなく、大潮にあたる。

(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。

(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

あると考える。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) レーザ透過率と懸濁物質の体積濃度

Gertner ら⁹⁾は、LISST-100のレーザ透過率が30%以下になると multiple scattering が顕著になり粒径の特定が困難になり、さらに、10%以下になると粒径分布は小さな粒径に偏りがちになることを報告している。

図5は、測定した塩分が1psu以下、8psu以下および18psu以下の場合のレーザ透過率 L_t 、懸濁物質の粒径が $10.2 \mu\text{m}$ および $88.2 \mu\text{m}$ の体積濃度 C_{102} 、 C_{882} と各粒径の懸濁物質の体積濃度の総和 C_t （以後、全体積濃度と記す）を示したものである。なお、図中のMFV、HWS、ZDC、MEV および LWS は、それぞれ上流向き流速が最大となる位相、最高水位の位相、縦断方向流速が上流向きから下流向きに変わる位相、下流向き流速が最大となる位相および最低水位の位相である。

塩分が1psu以下の(a)では、レーザ透過率は0.78以上であり変動も小さい。5月25日20時まではレーザ透過率の増減に反比例して全体積濃度は変動する。また、粒径が $10.2 \mu\text{m}$ および $88.2 \mu\text{m}$ の体積濃度はほとんど変化しない。(b)では、レーザ透過率は0.69以上である。また、レーザ透過率の変動が大きい時間帯では、粒径が $10.2 \mu\text{m}$ と $88.2 \mu\text{m}$ の体積濃度および全体積濃度とも変動が大きい。さらに、塩分が20psu以下の(c)では、レ

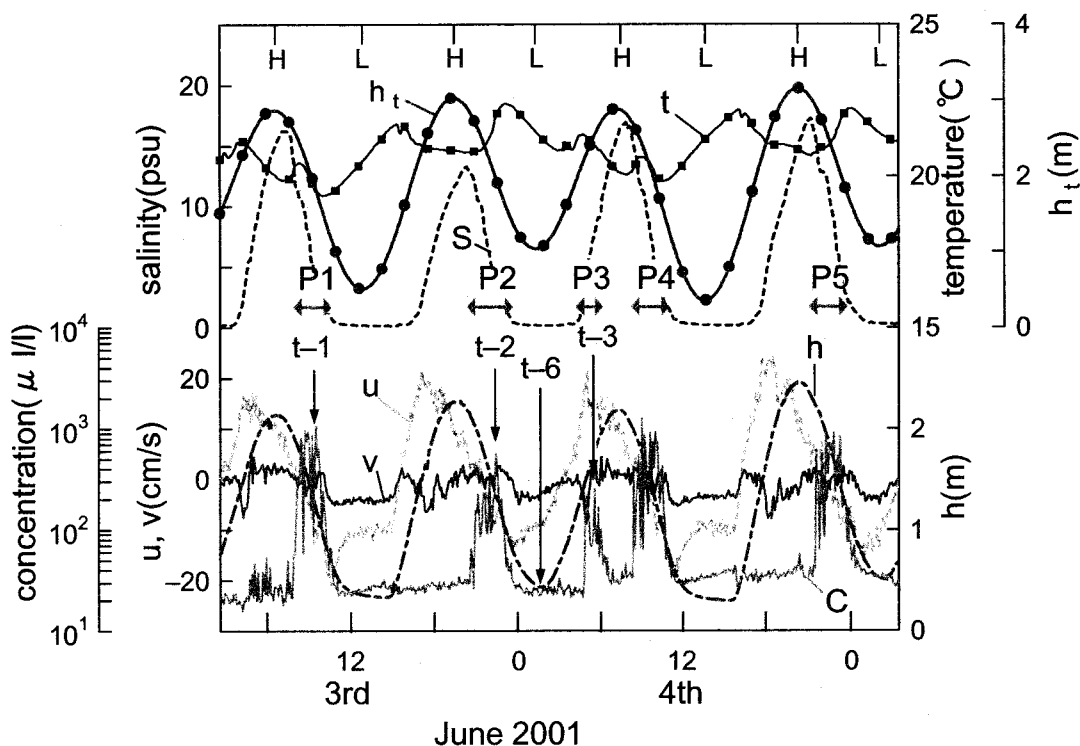
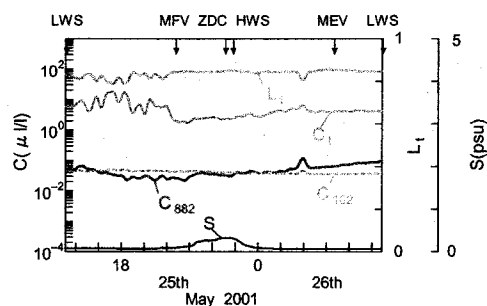
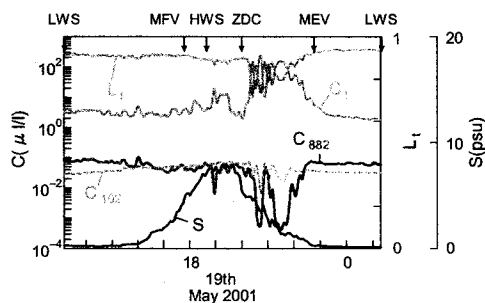


図4 測得データの時系列 (6月3～5日)

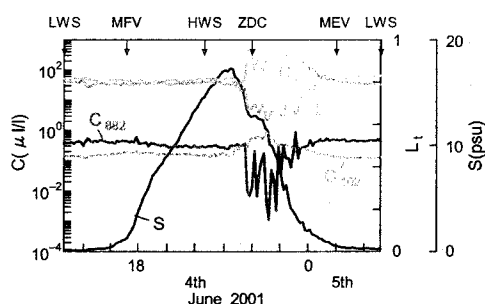
ーザ透過率は0.63以上である。レーザ透過率が変動する時間帯において、粒径が $10.2\mu\text{m}$ の体積濃度が微増することを除けば、(b)と似た傾向を示す。3ケースともレーザ透過率は60%以上であり、Gartnerらが指摘したmultiple scatteringが顕著となる30%以上であることから、LISST-100による粒径の推定値は、現地における懸濁物質の挙動を捉えるに足るものであると考える。



(a) $S < 1\text{psu}$



(b) $S < 8\text{psu}$



(c) $S < 20\text{psu}$

図-5 レーザ透過率と体積濃度

(4) 懸濁粒子の体積濃度

図4中の $P_1 \sim P_5$ は、懸濁粒子の体積濃度が比較的高い時間帯を表している。体積濃度は、縦断方向流速がほぼ 0m/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体積濃度は急激に低下する。これら懸濁粒子の体積濃度の変動は、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粒

子が輸送されてきたことによるものと考えられる。さらに、 P_2 および P_3 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粒子の体積濃度も高い値を示す。この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あるいは観測点より上流側に輸送された懸濁粒子が水位の低下に伴って流下してきたことに起因する。

P_3 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はないかと考えられる。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。

(5) 懸濁粒子の体積濃度と粒径

図6は、図4中の4つの位相における懸濁粒子の粒径と体積濃度を示したものである。図4中で懸濁粒子の体積濃度が比較的高い $t-1$ の位相および $t-2$ においては、懸濁粒子の粒径がほぼ $30 \sim 100\mu\text{m}$ の体積濃度が比較的低く、 $63.3\mu\text{m}$ の粒径で極小値を示す。また、ほぼ上流向き流速が最大となる $t-3$ の位相においては、懸濁粒子の体積濃度は $200\mu\text{l/l}$ 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 $30 \sim 100\mu\text{m}$ の体積濃度はかなり高い。一方、低潮時の位相、 $t-6$ 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 $30 \sim 100\mu\text{m}$ 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粒子と凝集したため、あるいは懸濁粒子がshearの増大によって分裂したため等が考えられるが、確かなことは現在までのところ明らかでない。

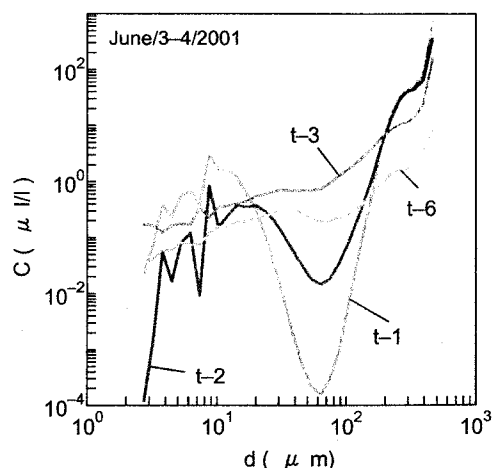


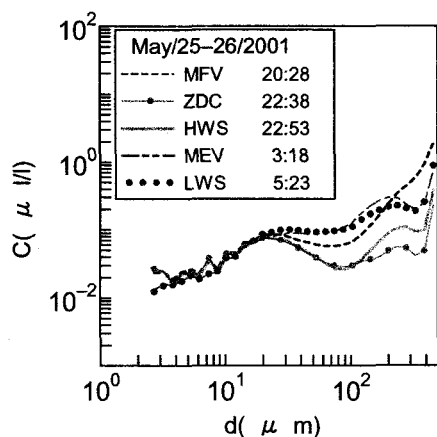
図-6 粒径別体積濃度

(6) 懸濁粒子の体積濃度に及ぼす塩分の影響

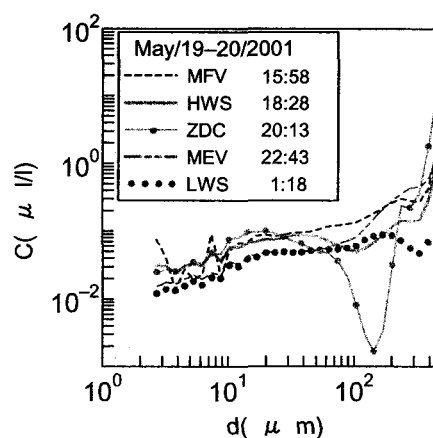
懸濁物質の濃度に及ぼす塩分の影響について検討したものが図-7である。なお、図中のMFV, HWS, ZDC, MEV およびLWSは、それぞれ上流向き流速が最大となる位相、最高水位の位相、縦断方向流速が上流向きから下流向きに変わる位相、下流向き流速が最大となる位相および最低水位の位相である。

(a)は、塩分が0.3 psu 以下で極めて低い場合であり、HWS とZDC が同位相の場合である。MFV の位相では、他の位相と比較し、どの粒径の体積濃度とも他の位相のそれらより高く、粒径が大きいものほど体積濃度も高い。また、MEV およびLWS の位相では、若干の増減はあるものの粒径が大きいほど体積濃度は高い。なお、HWS とZDC の位相では、粒径が $80\mu\text{m}$ 程度で体積濃度は極小値を示す。(b)は塩分が8psu 以下の場合である。MFV, HWS, MEV およびLWS の位相における懸濁物質の粒径と体積濃度との関係は、ほぼ(a)と似ている。しかしながら、ZDC の位相における粒径毎の体積濃度は、 $145\mu\text{m}$ で極小値を示し、 $281\mu\text{m}$ 以上の粒径の体積濃度は急激に高くなる。(c)は、塩分の最大値が10 psu 以上の場合である。いずれの場合とも、ZDC の位相における体積濃度は、粒径が $63\sim 104\mu\text{m}$ 程度で最小値を示す。また、 $202\mu\text{m}$ 以上の体積濃度は他の位相と比較して高い。なお、MFV, HWS, MEV およびLWS の位相における粒径毎の体積濃度は、ほぼ同一であり、粒径が大きいものほど体積濃度も高い。

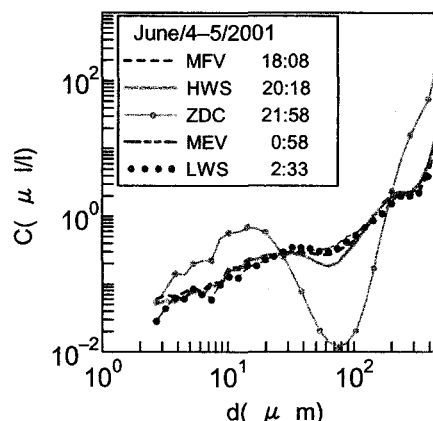
Riethmüller らは、ウェーザー川における観測から、turbidity maximum は潮汐の干満によって移動し、河口から8~12 km に出現し、塩分6 psu の等塩分線が河床に接する付近を上流端としている場合が多いことを報告している。(b)をみると、塩分の最大値が6~8 psu 程度になると、HWS あるいはZDC の位相における体積濃度が高くなることから、観測点付近においては凝集作用が活発である turbidity maximum が出現するのではないかと考えられる。



(a) $S < 0.3\text{psu}$



(b) $S < 8\text{psu}$



(c) $S_{\text{max}} > 10\text{psu}$

図-7 全体積濃度と塩分

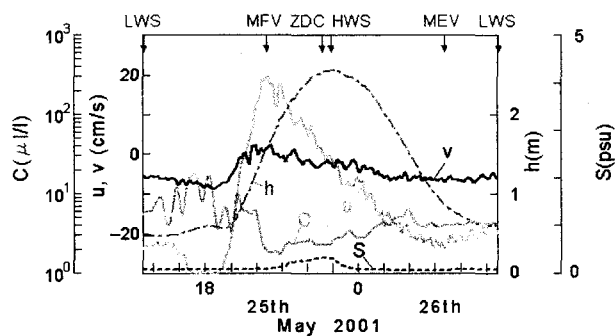
図-8は、最低水位から最低水位までの時間、ほぼ一潮汐間の水位、流速、塩分と懸濁物質の全体積濃度との関係について示したものである。(a)の河川流量は、 $27\text{m}^3/\text{s}$ から $19\text{m}^3/\text{s}$ へ徐々に減少する。なお、その平均値は約 $25\text{m}^3/\text{s}$ である。一方、(b)および(c)の河川流量は、それぞれ $11\text{m}^3/\text{s}$ および $10\text{m}^3/\text{s}$ 程度で一潮汐間を通して一定である。

(a)では、縦断方向流速が下流向きから上流向きに変わる位相付近より、全体積濃度は徐々に減少し、上流向き流速が最大となる位相、MFV、で極小値を取る。それ以降、流速振幅の減少に伴って全体積濃度は僅かずつではあるが高くなる。また、下流向き流速が最大となる位相、MEV、付近では全体積濃度はほとんど変化しない。縦断方向流速が正である時間に全体積濃度が低くなるという事実は、懸濁物質の輸送が上流からであることを示唆している。

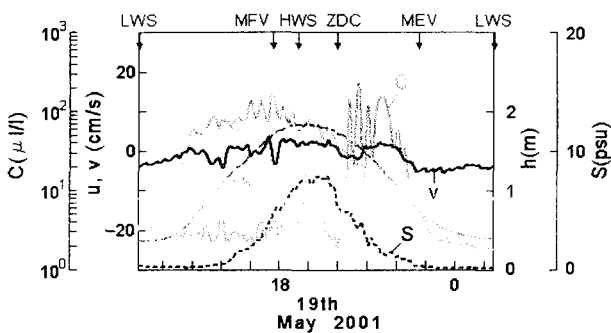
(b)では、水位がほぼ最大となる19時頃には全体積濃度は $10\mu\text{l/l}$ の小さなピークを示す。これは、塩水の遡上に起因する懸濁物質の凝集によるものではないかと考える。なお、縦断方向流速の向きが変わる位相付近から全体積濃度は急激に高くなる。その持続時間は2時間程度

である。この体積濃度の増大は、上流からの輸送によるものとする。また、(a)と同様、MEV の位相以降、全体積濃度はほとんど変化しない。

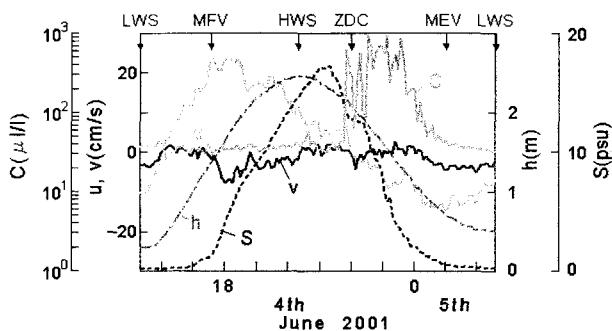
(c)では、全体積濃度は(b)の時間変化を上方へシフトした分布を示し、その値は(b)の 10 倍程度である。水位が最大となる 20 時 30 分頃には全体積濃度は僅かに高くなる。この傾向は(b)と似ている。さらに、縦断方向流速の向きが変わる位相付近から全体積濃度は急激に高くなり、2 時間程度その状態が続く。これは観測点付近で凝集した flocc の沈降あるいは縦断方向流速から判断すると、観測点より 500 m 程度上流側で凝集した flocc が輸送されてきたものであると考える。なお、(b)と同様 MEV の位相以降、全体積濃度の変化はほとんどない。



(a) $Q=27 \rightarrow 19 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) $Q=11 \text{ m}^3/\text{s}$



(c) $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$

図-8 一潮汐間での観測値の変化

5. おわりに

近年、わが国の一級河川で水中の懸濁粒子の増大や河岸および河床への堆積が報告されているが、観測結果の解析から、肱川においても例外ではなく、わが国の一級河川でみられる現象が確認された。すなわち、満潮時に塩分が 6~8 psu 程度以下になる場所付近では微細粒子同士の吸着が進行し、懸濁粒子の粒径が増大する。なお、肱川の河道内においてもシルトや粘土が堆積する領域もかなり存在することが確認される。

懸濁粒子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、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。

今回の観測で使用したレーザ回折式粒度測定器は、水中における懸濁粒子の挙動を解明するには極めて有用であることが確認された。

謝辞：観測に際し、便宜を図って頂いた国土交通省四国地方整備局山鳥坂ダム工事事務所に感謝する次第です。

参考文献

- 1) Leussen, W. van : Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs, In J. Dronkers and van Leussen eds, Physical Process in Estuaries, Springer-Verlag, pp.347-377, 1988.
- 2) Riethmüller, R. et al. : 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, 1988.
- 3) 丹保憲二・穂積 準・渡辺義公：ブロック形成過程の基礎的研究(1), 水道協会雑誌, 第 372 号, pp.10-19, 1965.
- 4) 楠田哲也・古賀憲一・栗谷陽一：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, 1978.
- 5) 楠田哲也・古賀憲一・栗谷陽一：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, 1980.
- 6) 安立重昭：塩水中におけるベントナイトのブ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, 1982.
- 7) 佐藤慎司・Harry Yeh・加藤史訓：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, 2001.
- 8) 鷺見栄一・鋤崎俊二：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, 2001.
- 9) Jeffrey W. Gartner, R.T. Cheng, Pei-F. Wang and K. Richter : Laboratory and field evaluation of LISST-100 instrument for suspended particle size determinations, Marine Geology, Vol.175, pp.199-219, 2001.

(2002. 9. 30 受付)