

肱川感潮域における懸濁粒子の動態

伊福 誠*・原楨利幸**

滞における塩分は、潮位差が小さい場合と大きい場合には、日周潮あるいは半日周潮程度の周期をもって変動する。このことは、modified estuarine Richardson number によって説明でき、100を境にして2つのグループに分けることができる。懸濁粒子濃度は水位が最低となる位相で急激に増大し、高濃度は1~2時間程度継続する。日潮不等や底面からの再浮遊を考慮した解析では、現地観測で得た結果をほぼ再現できたが、数値モデルが鉛直2次元であり、観測地点の局所性を反映できていないため、塩分の変動に対して観測結果とに差が生じている。この解決には3次元数値モデルの解析が必要となる。

1. はじめに

河川感潮域における懸濁粒子の輸送、沈降・堆積過程は、流速や化学的または生物学的な特異性により、湖沼や海洋と比較するとかなり異なった特徴を示すと推測される。

わが国においては、小田ら(1999)が室内実験に基づいて懸濁粒子の凝集機構を調べ、凝集には有機物の存在が深く関与していることを明らかにしている。また、山下ら(2002)は、現地河川における懸濁粒子の凝集過程について調べ、実海域では実験室と比較すると凝集が活発であることを得、現地河川における観測から懸濁粒子の移動量を試算している。さらに、横山ら(2001)は、環境に配慮した河川管理を行うにあたっては河川感潮域における地形や底質の形成機構を明確にすることが重要であるとの考えから、現地河川における観測から turbidity maximum の挙動を明らかにしている。なお、第一著者ら(2002)も、2001年に河川感潮域においてレーザー回折式粒度計やドプラー流速計等を用いた観測や2次元数値解析(2003)によって懸濁粒子の動態を調べ、塩分が8 psu 程度で凝集が活発になり、懸濁粒子濃度が急激に増大すること等を明らかにしている。

本研究では、2001年の観測が1点のみであったこと、数値モデルが堆積した懸濁物質の再浮遊を考慮していないことから、複数の観測点において塩分や懸濁粒子の動態を調べるとともに懸濁粒子の再浮遊過程や日潮不等を考慮した数値解析を行い、河川感潮域における懸濁粒子の動態を時空間的に把握し、堆積環境に及ぼす影響についての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

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。

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大洲市長浜町における推算値を用いた。

図-2は観測点の断面形状を示したものである。観測断面は左岸側に滞が存在し、右岸側に比較的幅が広く水深の浅いマウンドが形成されている。また、観測機器は右岸にある6 km の距離標(T.P. +4.6 km)より左岸側に79 m の滞のほぼ中央(以下、point-1と記す)と斜面の法肩にあたる右岸から66 m の地点(以下、point-2と記す)とそれより5 m 右岸側(以下、point-3と記す)の合計3点に設置した。滞に位置する point-1の水深は約3.8 m、point-2の水深は約1.7 m、point-3の水深は約1.3 mである。

(2) 観 測 機 器

point-1では、レーザー回折式粒度分布計(LISST-100)およびYSI ナノテック社製の6600Sを設置し、塩分濃度、DO、pH、濁度、水位および水温を計測した。LISST-100は、計測エリア内にある微粒子のレーザー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あり、測定範囲は2.5~500

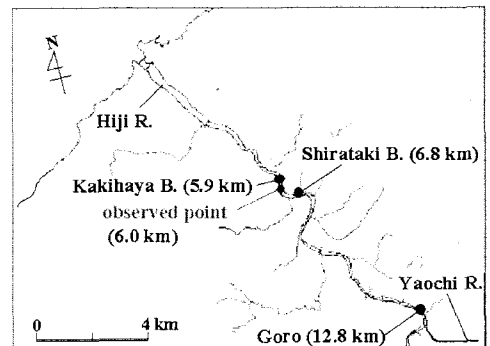


図-1 肱川感潮域の観測点

* 正会員 工博 愛媛大学教授 環境建設工学科
** 正会員 工修 (株)エイトコンサルタント 技術本部

μm である。

point-2では、流速3成分、水位および水温を計測するため SonTek 社製のドップラー式多層流速計 (PC-ADP) を設置した。PC-ADP は鉛直上向きに対して15度で3個の平面に120度設置されたセンサから超音波を発信し、設定した cell 位置において海水中に含まれている微粒子からの反射波を捉え、微粒子移動速度によるドップラーシフト量を計測し、3方向の流速成分を多層に渡り計測する。また、YSI ナノテック社製の6600を設置し、塩分を計測した。

point-3では、流速3成分、水位および水温を計測するためのドップラー式流速計 (ADV) を設置した。塩分濃度および濁度は、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。

観測期間は、大潮を挟んだ2004年2月12日から26日までである。なお、データのサンプリング間隔は各観測点の各物理量において5分である。また、流速の座標系は各観測点において縦断方向を x (上流方向を正)、横断方向を y (右岸方向を正)、鉛直方向を z (上方向を正) とした。

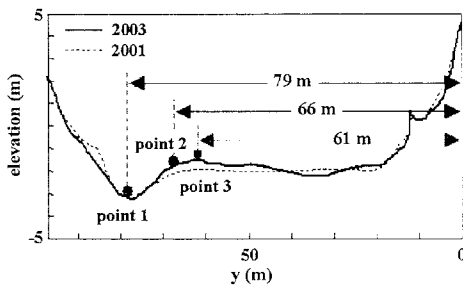


図-2 観測点付近の横断形状

3. 解析結果

図-3 は point-1 における観測結果の時系列である。2月17日および18日は中潮、2月19日から21日は大潮にあたる。潮位は肱川河口の右岸側に位置する長浜港におけるものであり、アプリケーションソフト“潮時表”から得たものである。なお、流速は欠測である。

a) 水位

観測点の水位は、潮位が満潮となる位相より5～20分程度遅れて最高となり、潮位が干潮となる位相より15～90分遅れて最低となる。なお、水位差は、17日と18日の中潮時で0.9～1.9 m、19日～21日の大潮時で1.6～2.1 mである。

b) 塩分

17日と18日の塩分の変動をみると、17日3時頃からの水位の上昇から約2時間遅れて塩分が増大し始め、水位

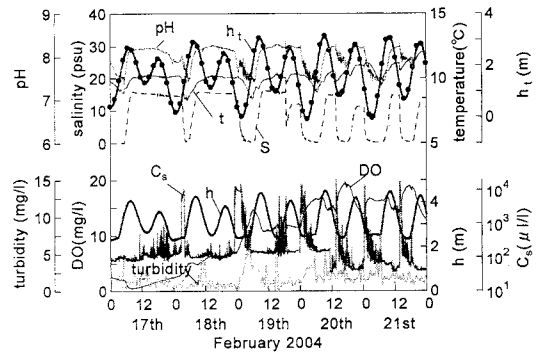


図-3 point-1 における各種物理量の時系列(2月17-21日)
(t : 水温, S : 塩分, C_s : 懸濁物質濃度, h : 水位, DO : 溶存酸素, ht : 長浜の潮位)

が最も高くなる位相より約1時間遅れて塩分は8時50分に15.9 psu となる。その後水位は変動するが、塩分は約15 psu を約24時間維持し、18日5時30分に0.5 psu まで減少する。その後、水位の上昇に伴い塩分は再び増大し、18日9時35分から約14時間、15 psu 程度を維持し、水位の減少とともに塩分も減少している。しかしながら、17日と比較すると高塩分を維持している時間が短い。その後、水位の上昇とともに塩分も上昇し、水位が極大値をとる1.5時間後に塩分は16.4 psu となる。また、水位が最小となる位相より1.5時間後に5.3 psu に減少するまで、約7時間高塩分を維持する。さらに、水位の上昇とともに塩分は増大し、水位が最高となる位相で12 psu となる。2月17日から2月19日18時付近の約15 psu の高塩分を維持する時間と比較すると3 psu の差があり、水位の減少に伴い塩分も減少する。20および21日は水位の変動と対応して塩分も変化する。

19日～21日では塩分は水位に対応して変動している。17日と18日は、長浜港における潮位は中潮にあたり、潮位の変動が小さいためである。19日～21日は大潮にあたり、潮位の変動が大きいため水位に対応して変動すると考える。

満潮と干潮の潮位差 $\Delta\eta$ が小さい場合 (17日6～18時、18日6時～18時) には、滞における塩分変動は潮位変動との相関が低く、下げ潮時においても高塩分を保持している。しかしながら、潮位差 $\Delta\eta$ が増大するにつれて、滞における塩分の変動は潮位変動と良く対応している。こうした塩分の挙動は、潮位変動や河川の固有流量と関連していると考えられるのでこれらの物理量を含む modified estuarine Richardson number, R_{IE}^* を用いて検討する。 R_{IE}^* は次式で与えられる。

$$R_{IE}^* = sgQ/Bu_*^3 \quad (1)$$

ここに、 $s = (\rho_s - \rho_f)/\rho_f$ 、 ρ_s および ρ_f は、それぞれ海水および淡水の密度、 g は重力加速度、 Q は河川の固有流

量, B は河口の河幅, u_* は摩擦速度である.

図-4 は R_{IE}^* と塩分が極小値となる時間から次の極小値までの時間 Δt との関係を示したものである. なお, 式 (1) 中の Q は Δt 時間における平均値を用いた. R_{IE}^* が 100 を境にはほぼ半日周潮と日周潮の周期を持つ 2 つのグループに分けることができる. また, R_{IE}^* が増大すると Δt も増大することから, $\Delta \eta$ が小さい場合の滞における塩分変動をうまく説明できる.

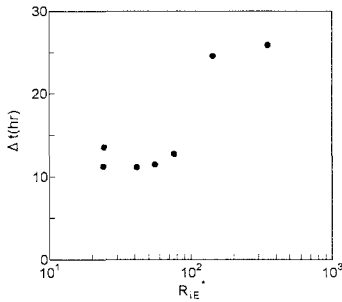


図-4 Δt と R_{IE}^*

c) pH, 水温と溶存酸素

pH は, 2月19日18時40分に最大値8.4, 2月20日5時30分に最小値7.3を示す. 最大値と最小値の差は約1であり, 塩分の変動とよく対応しているが大きな変動はみられない.

水温は2月17日5時15分から上昇し, 高塩分を維持している時間に水温も約10℃を維持する. 塩分の減少とともに水温も低下し, 塩分が最小となる位相とほぼ同位相で水温も最低となる. また, 水位が低下し, 塩分がほぼ0 psu となる2月20日6時付近で水温が約9℃に低下するまでの間, 塩分と対応して変化している. その後, 塩分と水温はよく似た変動をするが, 水温の低下は小さく, 2月20日6時55分に9℃に低下してから, 解析期間の2月22日0時までの間に約3℃上昇している.

塩分が高い場合にみられる水温の上昇は, 河川水より高温の海水が湧上したためと考える.

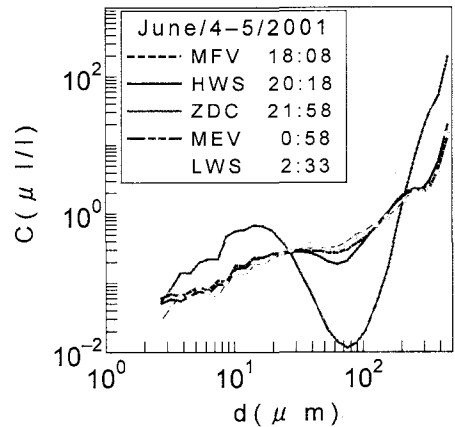
塩分と水温が上昇し始める2月17日の5時付近から減少し, 塩分が約15 psu を維持し始める位相とほぼ同じ位相から増加する. また, 2月18日の23時30分に塩分が減少し始める位相付近から DO は急増し, 2月19日の6時25分に14.6 mg/l に達すると, 塩分の上昇とともに DO は減少し, その後は塩分が上昇する時間では DO は減少し, 塩分の減少する時間において DO は増大する変動を繰り返す.

d) 懸濁粒子濃度

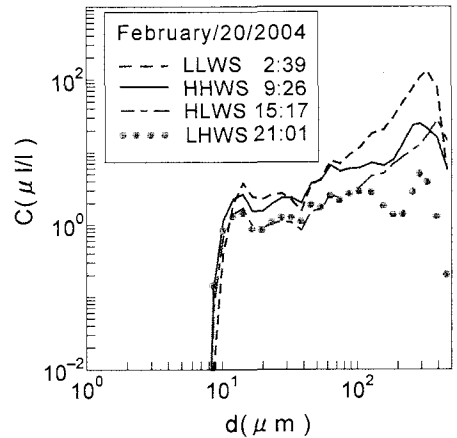
伊福ら (2002) は, 水位が最大となる位相より2時間程度遅れた縦断方向流速が上流向きから下流向きへ逆転

する位相付近から懸濁粒子濃度が急激に増大することを明らかにしている. 滞においては, 伊福らの結果とは異なり, 水位が最低となる位相で懸濁粒子濃度は急激に増大し, 高濃度は1~2時間程度継続する. このことは, 横断方向の局所性に起因するのではないかと考える. また, 塩分が減少し始めて8 psu 程度になるまで1,000 $\mu\text{l/l}$ 以上の高濃度を維持する. なお, 最小値は100 $\mu\text{l/l}$ 程度である.

図-5 は懸濁粒子の濃度スペクトルを示したものであり, (a) および (b) は, それぞれ2001年6月および2004年2月の観測結果である. 2001年6月の観測結果では, 粒径が2~300 μm の粒子が0.02~20 $\mu\text{l/l}$ の濃度を示し, 粒径が300 μm 以上の粒子の濃度が高くなっている. 一方, 2004年2月の結果をみると, 8 μm 以下と300 μm 以上の粒子を除けば, 懸濁粒子濃度は2001年の観測結果よりも高く, 粒径が10~300 μm の粒子の濃度は1~100



(a) 2001年6月



(b) 2004年2月

図-5 懸濁粒子の濃度スペクトル

$\mu\text{l/l}$ 程度であり、粒径が $300\mu\text{m}$ 以上の粒子の濃度は粒径の増大につれて低下している。また、 $8\mu\text{m}$ 以下の微細粒子の濃度は極めて低い。

2001年と2004年の濃度分布の差異は、2004年の観測点である point-1は図-2に示すように滞りに位置し河道内に形成されているマウンド上における2001年の観測点とは地形的条件が異なることや観測時期等が異なることが原因として考えられる。

4. 数値解析

基礎方程式や計算領域、各種係数の設定および境界条件は、底面からの懸濁粒子の pick-up と海側境界における日潮不等の有無を除けば伊福ら (2003) と同一である。

(1) 懸濁粒子の pick-up のモデル化

海田 (1998) は、一方向流中における底泥の巻き上げについて検討している。それによれば、初期の底泥の含水比が鉛直方向に一定ならば、底泥の圧密は巻き上げ速度にほとんど影響を及ぼさないとしている。そこで、底泥の巻き上げ速度に対する重要なファクターは底泥のせん断応力であるとして、以下のような限界底面せん断応力の経験式を提言している。

$$\tau_{ce} = \delta_1 (1 - \varepsilon)^{m_1} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 τ_{ce} は限界底面せん断応力、 ε は空隙率 (河床に堆積した懸濁粒子中の塩水の体積/懸濁粒子の体積)、 δ_1 および m_1 は係数である。

目視観測および水中写真撮影によると、肱川の河床に堆積している懸濁粒子の層厚は薄い。従って、空隙率は鉛直方向に一定と考え、式 (2) を用いて、肱川の河床に堆積している懸濁粒子の pick-up を評価する。

初期巻き上げフラックスは次式で与えられる。

$$E(t) = \delta_2 (\tau_0 / \tau_{ce} - 1)^{m_2} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 τ_0 は底面せん断応力、 δ_2 および m_2 は係数である。

底面においてフラックスの出入りがないと考えると、底面からのフラックスを何らかの形で与える必要がある。ここでは、底面において単位体積当たりの巻き上げフラックスを考慮し、時刻 t における巻き上げフラックス $E(t)$ を底面直上の薄い層、 δ_{ss} に与える。従って、薄い層内の懸濁粒子濃度 $C_{sb}(t)$ は次式で表される。

$$C_{sb}(t) = E(t) \Delta t / \delta_{ss} \dots \dots \dots (4)$$

限界底面せん断応力の経験式 (2) 中の空隙率 ε は 0.9、係数係数 δ_1 および m_1 は、それぞれ 4.3 N/m^2 および 1.5 とした。また、式 (3) 中の係数 δ_2 および m_2 は、それぞれ $2.0 \times 10^{-3}\text{ kg/m}^2/\text{s}$ および 2.3 とし、式 (4) 中の底面直上の薄い層厚、 δ_{ss} は 1 cm とした。

(2) 数値解析結果

数値解析の対象期間は2001年6月2日22時～6月5日

10時40分であり、この期間を1サイクルとして海側境界での潮位を与え、10サイクル繰り返し計算した。なお、潮位の変動量は $-1.5 \sim 1.5\text{ m}$ 、上流境界における河川の固有流量は $9.7 \sim 10\text{ m}^3/\text{s}$ である。以下、9サイクル目から10サイクル目にかけての結果について述べる。

a) 懸濁粒子濃度

図-6は、伊福ら (2002) が2001年6月の観測によって得た結果である。懸濁粒子濃度は、縦断方向流速が岸向きから沖向きに逆転する位相付近から急激に増大する。なお、その位相における塩分は 8 psu 程度である。

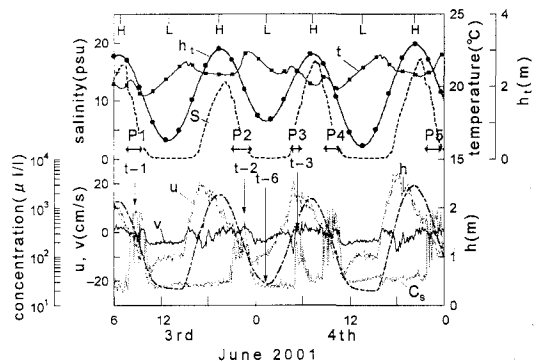


図-6 各種物理量の時系列 (2001年6月3-4日)

図-7は、長浜港における潮位の予測値を入力値として解析した結果である。計算結果をみると、図-6中の6月3日9時付近の懸濁粒子濃度の急激な増大を再現できていない。また、6月4日6時付近では、懸濁粒子濃度は小さなコブ状の変化のみみられるが、観測結果と比較するとその変動は僅かである。しかしながら、6月3日23時、4日11時および23時付近の急激な濃度の増大は再現できている。なお、観測結果における4日8時頃の懸濁粒子濃度は 30 mg/l 程度であるが、計算結果は低下の割合が観測結果よりも小さく、懸濁粒子濃度は 100 mg/l 程度である。日潮不等を無視した解析結果では、河口からの距離が 6.6 km の位置で懸濁粒子濃度は最大であるが、日潮不等を考慮した解析結果では、 $x = 7.0\text{ km}$ で懸濁粒子濃度は最大値を示す。

b) 潮位、流速、塩分および懸濁粒子濃度の変動

図-8は、観測点にあたる河口から 6 km 上流の位置の河床から 0.1 m 上方における縦断方向流速、塩分および懸濁粒子濃度を海側境界で与えた潮位変動とともに示したものである。懸濁粒子濃度は、縦断方向流速が上流向きから下流向きに逆転する位相付近から急激に増大し、比較的長時間、高濃度を維持している。なお、塩分の変動が図-6の結果と異なり、時間的な変動が小さい理由としては、観測結果は観測地点付近に形成されているマ

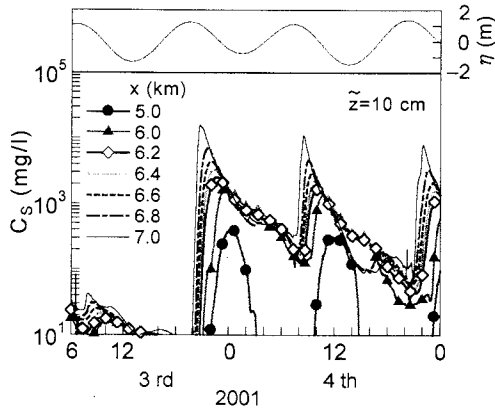


図-7 日潮不等を考慮した懸濁粒子濃度

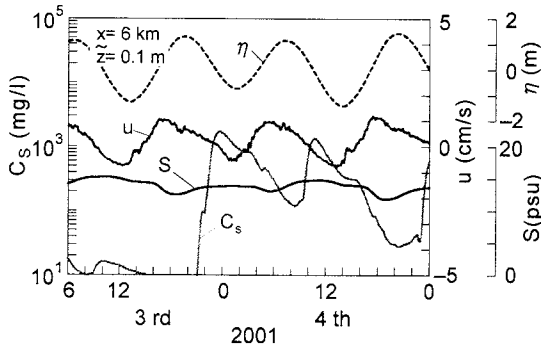


図-8 河口から6 kmでの流速、塩分および懸濁粒子濃度

ウンド上の平均水深が1.8 m 程度の位置で得られたものであり、計算結果は最深河床の3.8 m を使って計算しているためではないかと考える。

5. おわりに

- (1) 懸濁粒子濃度は水位が最低となる位相で急激に増大し、高濃度は1～2時間程度継続する。また、懸濁粒子濃度は2001年よりも2004年の観測結果が高くなっているが、粒径が大きな粒子の濃度は低下している。

このような濃度分布の差異は、観測点の地形的条件が異なることや観測時期等が異なることが原因として考えられる。

- (2) 滞における塩分の変動は、満潮から満潮までの間における満潮と干潮の潮位差が小さい場合には、潮位変動との相関が低く高塩分を保持している。このことを R_{IE}^* を用いて検討すると、 R_{IE}^* が100を境にほぼ半日周潮と日周潮の周期を持つ2グループに分けることができ、滞における塩分変動をうまく説明できる。
- (3) 日潮不等を考慮した解析では、現地観測で得た結果をほぼ再現できたが、鉛直2次元モデルであることから、観測地点の局所性を反映できていないため、観測結果との差異が生じている。観測結果を十分な精度で再現するには、3次元を対象とした解析が必要である。

謝辞：本研究における観測に関しては、国土交通省四国地方整備局大洲河川国道事務所にお世話になった。

なお、本研究は、日本学術振興会科学研究費（基盤研究(B), No.14350262）の一部として行われた。

参 考 文 献

- 伊福 誠・合田宏隆・中田正人(2002)：肱川感潮域における懸濁粒子の観測，海岸工学論文集，第49巻，pp. 351-355。
- 伊福 誠・合田宏隆・中田正人(2003)：肱川感潮域における高濁度水塊の挙動の数値解析，海岸工学論文集，第50巻，pp. 406-410。
- 海田輝之(1998)：底泥の巻き上げと懸濁物質の沈降に関する研究，九州大学学位論文，185p。
- 小田一紀・宋 元平・芝村 圭・農本 充(1999)：塩水中における微細土粒子の凝集・沈降過程に関する研究—ベントナイトをモデルとして—，海岸工学論文集，46巻，pp. 981-985。
- 酒巻輝幸(1996)：潮時表，<http://www.twin.ne.jp/~sakamaki/>
- 山下俊彦・森田真郷・杉原幸樹・斉藤大作・山崎真一(2002)：石狩川河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集過程に関する研究，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1016-1020。
- 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。