

河川感潮域における流動と懸濁粒子の動態

川 西 澄*・筒井孝典**・西 牧 均***

非定常、非一様性の強い河川感潮域における懸濁粒子の輸送と堆積機構を明らかにするためには、流速と懸濁粒子の時間的、空間的変動を把握する必要がある。流速とともに散乱体の濃度に関係する体積後方散乱係数が得られる超音波ドップラー流速分布計を用いて、太田川放水路にて縦断移動観測と定点観測を行った。下げ潮期と上げ潮期とは輸送形態が大きく異なる。平水時、下げ潮期の太田川放水路では、陸域からの懸濁粒子はほとんど堆積することなく、上層を通過して広島湾表層に流出している。上げ潮期では河口付近から 1.5 km 上流付近で河床材料が再懸濁し、上流に輸送され、それらの多くが河口から 1.8 km 上流付近の河床に堆積していると考えられる。

1. はじめに

河川感潮域は潮汐の影響を受け、流れや水質が時間的、空間的に大きく変動する。そこでの懸濁粒子は陸域から輸送されるもの、海から遡上してくるもの、河床に堆積するもの、再懸濁するものなどさまざまなものが存在する。窒素・リン等の栄養塩を含んだ懸濁粒子が堆積する位置や量を把握することは、感潮域における物質輸送・循環、水質、生態系を考えるうえで重要である。そのためには流速とともに懸濁粒子濃度を同時に測定することが必要である。採水と濁度計による多点連続測定は大変な労力を要し費用もかかる。超音波ドップラー流速分布計は流速と同時に得られる水中散乱体からの反射強度を利用して水中散乱体である懸濁粒子の分布が推定できる(川西ら, 1998)。また、横山ら(2002)は超音波流速計から長期にわたって断面通過土砂量の把握に利用している。そこで太田川放水路にて縦断移動観測と定点観測を行い、流速と懸濁粒子分布の時間的、空間的変動を把握する。

2. 方 法

(1) 観測地点と測定方法

太田川放水路は広島デルタの最西部に位置している。河口から上流の市内派川の分岐点までの距離は約 9 km で、河口部の川幅は約 460 m であり、河口から上流 5 km までの区間は直線である。観測区間の河床材料は太田川工事事務所による平成 8 年度調査によれば、砂質土($d_{50}=0.3\sim0.7$ mm)である。

2002 年 7 月 8 日(中潮)に太田川放水路の河口から約 4 km 上流までの区間を下げ潮期、上げ潮期それぞれ 1 往復ずつ流速と水質の縦断移動観測を行った。また、測線の正確な位置を把握するため、流速データと共に GPS データを 1 秒間隔で記録した。流速と超音波散乱強度の

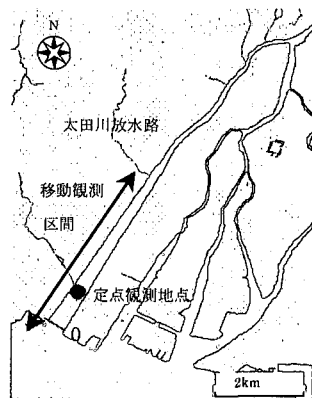


図-1 観測地点

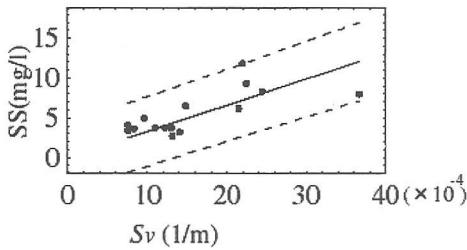
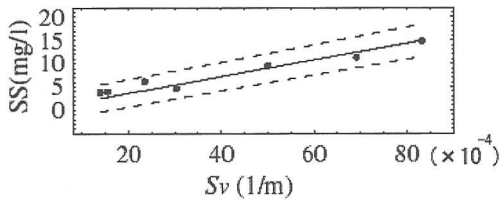
鉛直分布は Nortek 社製の超音波ドップラー流速分布計 (NDP, 周波数 1.5 MHz) を用いて測定した。NDP のセンサーヘッドは下向きで、トランスデューサーの位置は水面下 0.3 m とした。測定層厚は 0.25 m、記録間隔は 5 秒とした。水質測定にはアレック電子社製の TPM クロロテックを使用し、水温、塩分、濁度、クロロフィル a の鉛直分布を測定した。縦断移動観測、定点観測ともに国土交通省中国地方整備局の水面清掃船「あき」(喫水は約 0.6 m)を使用した。

縦断移動観測の結果、濁度の変動が大きかった河口から 1.2 km 上流において、2002 年 9 月 18 日(中潮)に定点観測を行った。定点観測の内容は超音波ドップラー流速計 (ADV) を用いた河床付近の流速と体積後方散乱係数 (S_v) の測定、NDP を用いた流速と S_v の鉛直分布の連続測定、水質の鉛直分布測定、懸濁粒子重量濃度測定のための採水である。ADV (10 MHz) は約 40 分おきに河床上約 5 cm に降ろし約 8 分測定した。NDP のトランスデューサーの位置は水面下 0.25 m とした。NDP の第 1 層目の測定位置である水面下 0.9 m (表層)、水深の中心(中層)、ADV の測定位置(底層)の 3 点で真空ポンプによって採水を行った。採水サンプル (1 l) は実験室に持ち帰った後 Wattman GF/C で濾過し、懸濁粒子の重

* 正 会 員 工 博 広島大学助教授 大学院工学部社会環境システム専攻

** 学生会員 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

*** 正 会 員 国土交通省中国整備局 太田川工事事務所所長

図-2 NDPの S_v と SS の関係図-3 ADVの S_v と SS の関係

量濃度を求めた。

(2) 懸濁粒子重量濃度と体積後方散乱係数の関係

水中に浮遊している散乱体の移動速度を計測する NDP と ADV は流速とともに散乱体の濃度に関係する後方散乱強度が得られる。川西・松山 (2002) は散乱実験で密度と音速が既知で後方散乱断面積がわかっているポリスチレン粒子を用いて、粒子の数密度と後方散乱強度の関係を調べ、後方散乱強度から体積後方散乱係数 (S_v) への変換係数を決定した。また、定点観測での採水による懸濁粒子重量濃度 (SS) と NDP と ADV の体積後方散乱係数 (S_v) の関係結果をそれぞれ図-2、図-3 に示す。両者には比例関係が認められ、最小二乗法により比例定数を求め、NDP、ADV のデータから懸濁粒子濃度を換算した。相関係数はそれぞれ 0.72, 0.98 であった。縦断移動観測、定点観測ともにこの関係を使用すると、懸濁粒子濃度の鉛直分布を連続的に測定できることになる。

3. 結果および考察

(1) 定点観測

図-4 に河床上約 5 cm に取り付けした ADV による主流方向流速 (a)、底面せん断応力 (b)、侵食速度 (c)、採水による懸濁粒子重量濃度 (d) の経時変化と、NDP による懸濁粒子濃度の水深-時間分布 (e) を示している。ただし河床上約 5 cm のレイノルズ応力を底面せん断応力とみなした。横軸は時間で、14 時が干潮である。主流方向流速は干潮の 2 時間後付近で最大となっている。それに伴い大きな底面せん断応力が河床に働いている。15 時付近で懸濁粒子の鉛直乱流フラックスである侵食速度は $30 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ 以上になっている。なお、図-4(c) の懸

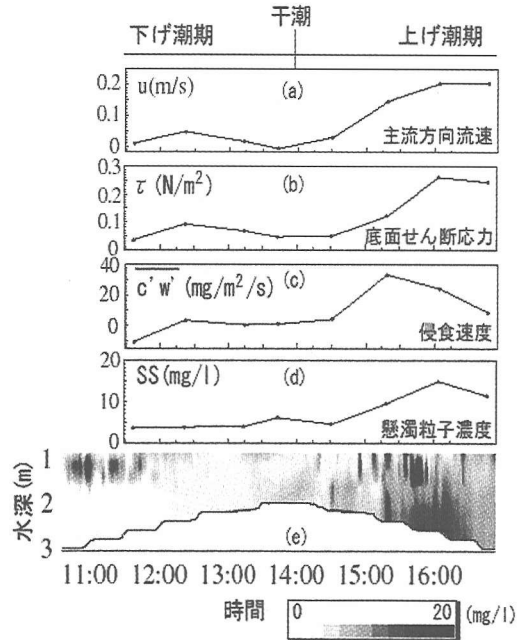


図-4 定点観測結果

濁粒子濃度の変動 c' は図-3 の関係を使って S_v の変動から求めている。また、活発な再懸濁は約 1 時間持続している。その後、河床付近での懸濁粒子濃度は下げ潮期と比べて 4 倍以上になっている。

図-4(e) のコンター図からも下げ潮期と上げ潮期の底層での懸濁粒子濃度の違いがうかがえる。図-4(c) の侵食速度は底面せん断応力が最大になる前に最大となっている。これは河床材料の侵食抵抗が深さ方向に増加しているため、底面せん断応力によって圧密前の表層堆積物が再懸濁している可能性や、観測地点より下流から輸送された再懸濁粒子が影響したと考えられる。定点観測、縦断移動観測ともに潮汐は中潮であったが、横山ら (2001) は約 2 週間の観測より沖合と河口の SS は潮位差の大きい大潮から中潮で相対的に高くなり、潮汐差の小さい小潮では低くなる結果を得ている。

図-4(e) のコンター図にみられる 11 時付近の水深約 1.5 m 付近に現れている高い値は、塩分躍層による散乱の影響と考えられる。波長の短い音波の場合、屈折率の変動による音響散乱が生じる (Seim, 1999)。屈折率の変動スペクトル ϕ_η は次式で表される。

$$\phi_\eta = a^2 \phi_T + b^2 \phi_S + 2ab \phi_{ST} \dots \dots \dots (1)$$

ここで ϕ_T : 温度スペクトル, ϕ_S : 塩分スペクトル, ϕ_{ST} : 塩分と温度のコスペクトル, c : 音速である。また、

$$a = \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial T} \Big|_{s,T}, \quad b = \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial s} \Big|_{s,T} \dots \dots \dots (2)$$

塩分躍層では a は b より非常に小さかった。塩分変動ス

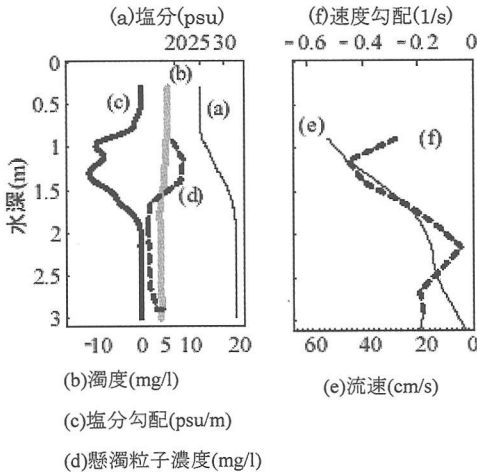


図-5 11:20における鉛直分布

ペクトルは測定されていないが、速度勾配とともに大きくなると考えられる。塩分勾配と速度勾配がともに大きいところでは音波の屈折率の変動により散乱が起る。

図-5は11:20における塩分、濁度、塩分勾配、 S_v から求めた懸濁粒子濃度、流速、速度勾配の鉛直分布を示している。 S_v が大きくなっている1mから1.5mの深さで塩分勾配と速度勾配がともにピークをさしている。また、(b)の濁度がほぼ一定であることから S_v は大きく見積もられている。

(2) 縦断移動観測

図-6は縦断移動観測実施日の河口における水位の経時変化を示したものである。①～④は観測区間を示しており、図-7、図-8中の番号と対応している。片道約4

kmを40～60分で移動した。NDP内臓のコンパスで東西南北成分に変換された速度はbottom track速度を用いて流速に変換後、座標回転を施して放水路縦断方向と横断方向の流速成分を得た。縦断方向の流速に図-2の関係から求めた懸濁粒子濃度を掛け合わせた懸濁粒子フラックスの縦断面内分布を図-7に示す。図の下方に示した河床は、NDPの散乱強度から推定したものであるが、船が完全に同じ測線上を移動していないので、各縦断面で若干河床形状が異なっている。横軸は河口部を0とした上流方向への縦断距離を、縦軸は水面からの深さを表した。NDPの第1測定層の深さである0.95mから水深の90%までを表示している。ただし、下げ潮期①、②では下流方向流速を正に、上げ潮期③、④では上流方向流速を正としている。

下げ潮期では上層での懸濁粒子フラックスに比べて下層でのフラックスが非常に小さいことから、懸濁粒子はほとんど堆積することなく上層を通して輸送されている。上げ潮期では河口付近から約1.5km上流付近にかけて大きなフラックスが発生している。これは図-4の定点観測の結果から河床堆積物の再懸濁が原因であることがわかる。下げ潮期と異なり、上層より下層で大きなフラックスが発生しており、③と④で大きなフラックスの範囲があまり変わっていないことから、再懸濁粒子が

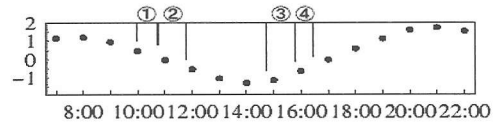


図-6 7月8日の河口水位の経時変化と観測期間

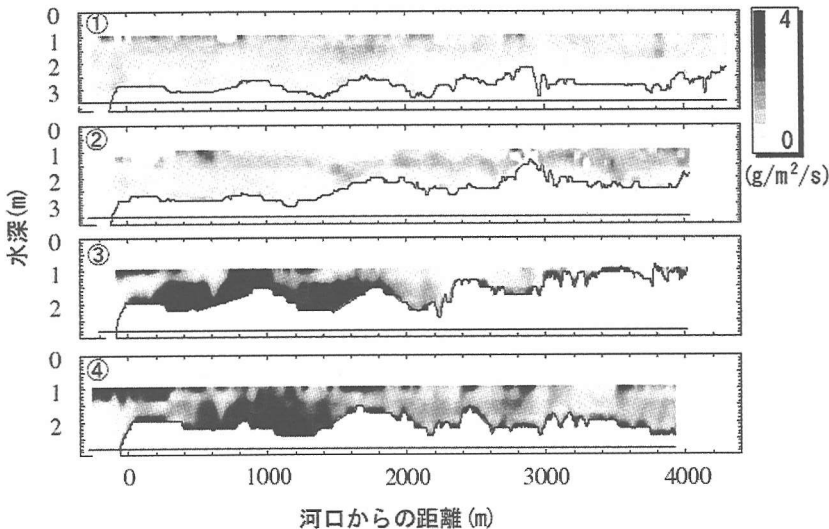


図-7 懸濁粒子の主流方向フラックスの縦断面内分布

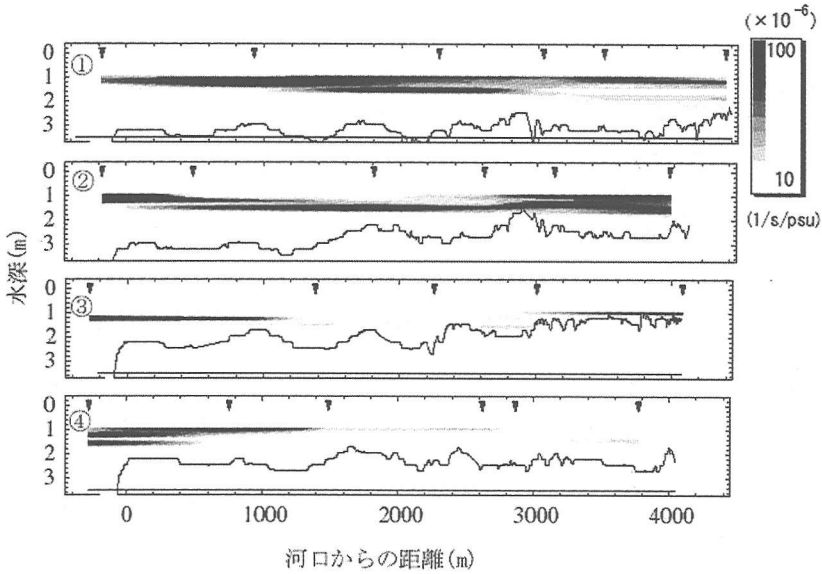


図-8 音波の屈折率変動パラメーターの縦断面内分布

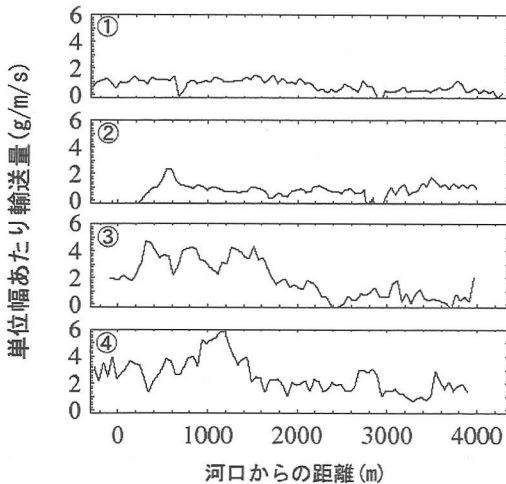


図-9 単位幅あたりの懸濁粒子輸送量

長い距離を遡上しているとは考えにくい。

図-8は音波の屈折率変動パラメーターの縦断面内分布を示している。図上部に示された下向きの矢印はTPMクロロテックを昇降させて水質の鉛直分布が得られた位置を示している。下げ潮期では観測区間全体に水深1.5m付近で音波の屈折率変動が大きな値を示している。図-7からも下げ潮期に同じ水深付近でやや大きい懸濁粒子フラックスが現れているが、塩分躍層での散乱が起こっている可能性がある。上げ潮期には河口から1.5km付近まで音波の屈折率変動が水深1.5m付近で大きな値を示している。下げ潮期の水深1.5m付近の懸濁粒子フラックスが仮にすべて塩分躍層による散乱に

よって測定されたとしても図-7の①, ②から約1g/m²/s程度であることが分かる。また、上げ潮期には速度勾配が小さいことから音波の屈折率変動パラメーターは小さく、塩分躍層が上げ潮期の懸濁粒子フラックスに与える影響は小さいと考えられる。

NDPで測定される水深 h の90%から深さ0.95mまでのフラックスを使って単位幅あたりの懸濁粒子輸送量 q を次式で求めた。

$$q = \int_{0.95}^{0.9h} u(z)C(z)dz \dots\dots\dots (3)$$

$u(z)$, $C(z)$ はそれぞれ水深 z での縦断方向流速と懸濁粒子濃度である。 q の縦断分布を図-9に示す。上げ潮期③, ④に比べ、下げ潮期①, ②には輸送量は小さい。下げ潮期では輸送量が河口からの距離によらずほぼ一定であることから、再懸濁・堆積することなく広島湾へ懸濁粒子が輸送されている。③から、上げ潮初期、広島湾からの懸濁粒子の輸送量は河道内における再懸濁粒子の輸送量より小さい。また、河口から1.8km上流付近で輸送量が大きく減少していることから、再懸濁粒子はこの付近で河床に堆積していると考えられる。

4. ま と め

非定常性の強い太田川感潮部における懸濁粒子の動態を把握するために縦断移動観測と定点観測実施した結果、以下のことが明らかになった。

下げ潮期と上げ潮期で懸濁粒子の輸送形態が大きく異なる。平水時、下げ潮期の太田川放水路の河口から4kmまでの観測区間では、陸域からの懸濁粒子はほとんど河

床に堆積することなく、上層を通して広島湾表層に流出している。上げ潮期では河口付近から1.5 km 上流付近で河床材料が再懸濁し、上流に懸濁粒子が輸送され、それらの多くが河口から1.8 km 付近の河床に堆積している。活発な再懸濁は約1時間持続していた。海から懸濁粒子が遡上する量は再懸濁による輸送量に比べて小さい。

超音波ドップラー流速分布計を用いて体積後方散乱係数 (S_v) から懸濁粒子濃度に換算する場合、塩分勾配と速度勾配がともに大きいときには音波の屈折率変動が大きくなるため、強い散乱が起こり、懸濁粒子濃度を大きく見積もってしまうことがある。

今回、下げ潮期、上げ潮期1往復ずつ縦断移動したが、今後は潮汐の全位相をカバーし、潮汐や出水の違いによ

る異なる輸送過程も調べる予定である。

参 考 文 献

- 川西 澄・内田卓志・松山幸彦・余越正一郎 (1998): 浅海域における ADCP を用いた濁度分布の観測, 沿岸海洋研究, 第 35 巻, 第 2 号, pp. 203-210.
- 川西 澄・松山幸彦 (2002): 内湾域に存在する海中浮遊粒子からの音響散乱, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 991-995.
- 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.
- 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, pp. 1486-1490.
- Seim, H. E. (1999): Acoustic Backscatter from Salinity Microstructure, American Meteorological Society., Vol. 16, pp. 1491-1498.