

河川感潮域における懸濁粒子の航走観測

OBSERVATIONS OF SUSPENDED PARTICULATE MATTER IN TIDAL RIVER USING VESSEL-MOUNTED CURRENT PROFILER

川西 澄¹・本宮 和照²・西牧 均³
Kiyosi KAWANISI, Kazuteru HONMIYA and Hitoshi NISHIMAKI

¹ 正会員 工博 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

² 学生員 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

³ 正会員 国土交通省中国地方整備局 太田川工事事務所所長 (〒730-0013 広島市中区八丁堀 3-30)

An acoustic Doppler profiler (NDP) mounted on a vessel was used to observe distributions of velocity and suspended particulate matter (SPM) in the Ohta Estuary. Salinity, temperature, turbidity, chlorophyll-*a* and water samples were also collected. The volume scattering coefficient deduced from NDP data correlated with the turbidity from optical backscattering sensor. The concentration and flux of SPM in the longitudinal section were investigated by the vessel-mounted NDP. During the early stage of flood tide, the highest concentration of SPM were found around 1,000 m upstream. This high concentration was consequent on sediment resuspension caused by strong flood current. During the flood tide, the SPM concentration in lower layer became the maximum around 1,000 m upstream and then decreased gradually as proceeding upstream. The downstream flux of SPM in upper layer was larger than that in lower layer during the ebb tide.

Key Words: *suspended particulate matter, acoustic backscatter, particle concentration, particle flux, tidal river*

1. はじめに

一般に、河川感潮域における懸濁粒子の分布は時間的、空間的な変化が大きく、その動態を把握するためには、水平、鉛直方向に配置した多点における同時連続的な測定が要求される。例えば、Weser 感潮域で行われたような大規模な観測が必要となる¹⁾。もし、観測船で移動しながら流速と懸濁粒子濃度の鉛直分布を連続的に測定できれば、より少ない労力と費用で懸濁粒子の動態を詳細に把握・考察することが可能となる。

水中に浮遊している散乱体の移動速度を計測する超音波ドップラー流速計から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。Kawanisi ら²⁾は太田川感潮域で、超音波ドップラー流速計(以降、ADV と略記する。)の散乱強度を利用して懸濁粒子の鉛直フラックスに関する詳細な検討を行っている。また、広島湾における底層懸濁粒子の濃度が、超音波ドップラー分布計(以降、NDP と略記する。)の散乱データを解析して求めた体積後方散乱係数と比例関係にあることが明らかにされている³⁾。末次ら⁴⁾は感潮域の河床に固定された NDP から得られ

る散乱データを、河口域の土砂動態の把握に利用している。

本研究は、太田川感潮域における懸濁粒子の動態を 1.5 MHz の NDP を用いた航走観測から検討したものである。

2. 方法

(1) 観測地点と測定方法

広島市西部に位置する太田川放水路の河口から約 4,000 m 上流までの区間で流速と水質の鉛直分布の航走観測を行った。太田川放水路は河口から約 9,000 m 上流で市内派川と分岐しており、放水路上流端には祇園水門、市内派川側には大芝水門がある。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 ($d_{50} = 0.3 \sim 0.7 \text{ mm}$) である。感潮域であるため、放水路に流入している正確な淡水量は不明であるが、分岐点の上流にある矢口第 1 観測所の河川流量は観測期間中 20~50 m³/s であった。なお、通常時の祇園水門の開度は 0.1 m、大芝水門は全開になっている。航走観測には国土交通省中国地方整備局の水面清掃船「あき」(喫水は約

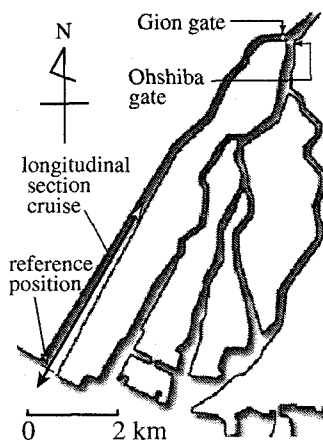


図-1 観測区間

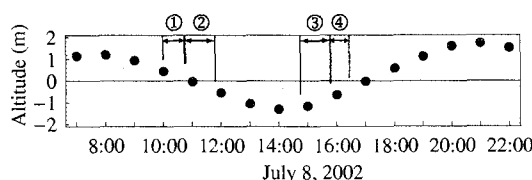


図-2 河口水位の経時変化と観測期間

0.6m) を使用した。

図-2 は観測実施日である 2002 年 7 月 8 日の放水路観測区間を図-1 に示す。河口における水位の経時変化を示したものである（潮汐は中潮）。図-2 中に示すように、下げ潮期と上げ潮期にそれぞれ 1 往復ずつの航走観測を行った。流速と超音波散乱強度の鉛直分布は、Nortek 社製の超音波ドップラー分布計 (1.5MHz-NDP) を用いて測定した。測定層厚は 0.25m、記録間隔は 5 秒とした。超音波散乱強度は、ソナー方程式を用いて体積後方散乱係数に変換したが、その際必要となる水による音波の吸収係数として 0.6 dB/m の値を用いた⁵⁾。NDP 内蔵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、座標回転によって放水路縦断方向と横断方向との流速成分に分割された。なお、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。

水質の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、クロロフィル蛍光の鉛直分布を航走中に数箇所測定した。また、懸濁粒子濃度を測定するため、TPM クロロテックの昇降とほぼ同時期に真空ポンプを用いて採水を行った。各採水サンプル (1ℓ) は実験室に持ち帰った後、Wattman GF/C で濾過し、懸濁粒子の重量濃度を求めた。

(2) 懸濁粒子の重量濃度、濁度、

超音波体積後方散乱係数の関係

TPM クロロテックの濁度センサー (OBS; 赤外線後

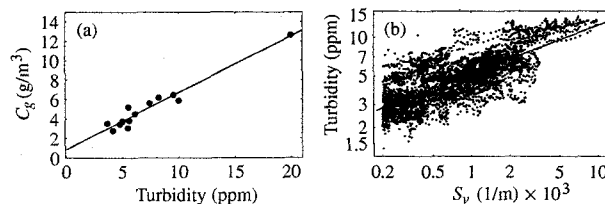


図-3 懸濁粒子の重量濃度と濁度、体積後方散乱係数の関係

方散乱式) の指示値を重量濃度に変換するため、採水サンプルから求めた重量濃度との関係を示したものが図-3(a) である。両者はほぼ比例関係にあり、サンプル数が少ないので再検討の余地も残っているが、両者はほぼ比例関係にあり、図中の最小 2 乗直線を用いて濁度を重量濃度に変換することが可能である。一方、採水を行った水深の大半が NDP のサイドローブ干渉領域であったことから、NDP の体積後方散乱係数 S_p と比較できる重量濃度はほとんどなかった。そこで以下に述べるように、重量濃度の代わりに濁度計との比較を行うことにした。

図-3(b) は、多数の比較データが得られている固定点連続観測結果⁶⁾ を解析したものである。すなわち、河口から約 2,500 m 上流において、潮汐 1 周期間にわたり河床上 0.1~1 m の間を約 30 秒間隔で自動昇降させた TPM クロロテックによって得られた濁度と本観測で使用した NDP から得られた体積後方散乱係数 S_p とを比較したものである。データは両対数でプロットされているが、図中に示した最小 2 乗直線の勾配は 0.37 で、濁度と S_p の関係は線形ではない。これは、赤外線と音波の粒径に対する散乱特性 (Mie 散乱と Rayleigh 散乱) が異なっているためであり、濃度変化と粒径変化の相関を反映した結果と考えられる。一般に、感潮河川における懸濁粒子の沈降速度は凝集の効果も含めて、粒子の濃度が高いほど大きくなることが報告されている⁷⁾。

なお、データの散らばりが大きくなっている原因の 1 つは、深さによって濁度と S_p の関係が異なっているためである。すなわち、 S_p の変化に対する濁度の変化は上層ほど大きく、河床付近よりも上層の方がより細かな粒子が懸濁しているものと考えられる。

以上のように体積後方散乱係数 S_p を濃度に変換する場合、粒径の変化に起因した誤差が存在することになる。ただし、粒径の増加がフロック化によるものであれば、 S_p に与える粒径の影響は Rayleigh の散乱理論から予測されるほど大きくないものと判断される³⁾。さらに、懸濁粒子の粒径に関する情報が少ないので、本論文では研究の第 1 段階として図-3 に示す最小 2 乗法によって求められた関係 (S_p と濁度、濁度と重量濃度) を使って、 S_p から懸濁粒子の重量濃度を推定した。

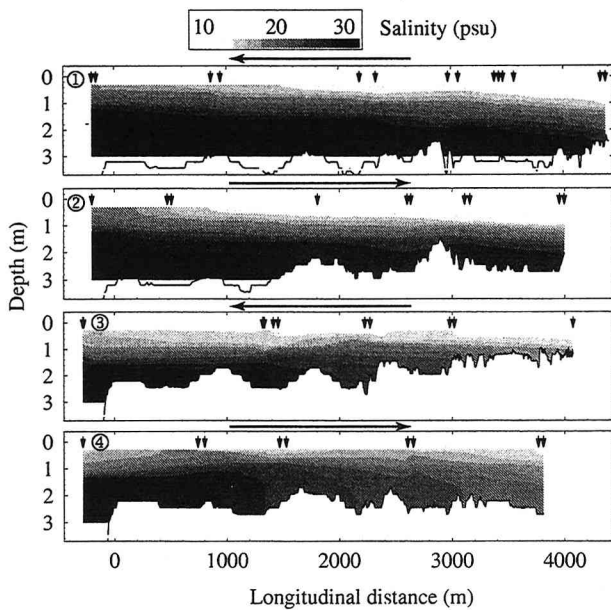


図-4 塩分の縦断面内分布

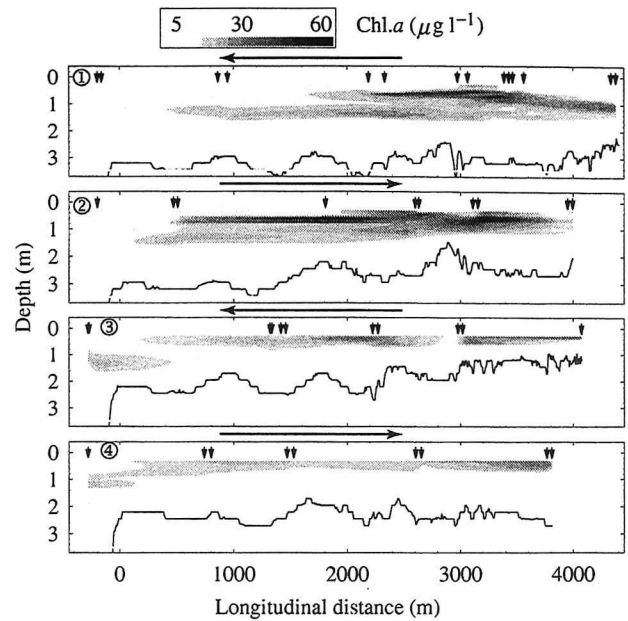


図-6 Chl.aの縦断面内分布

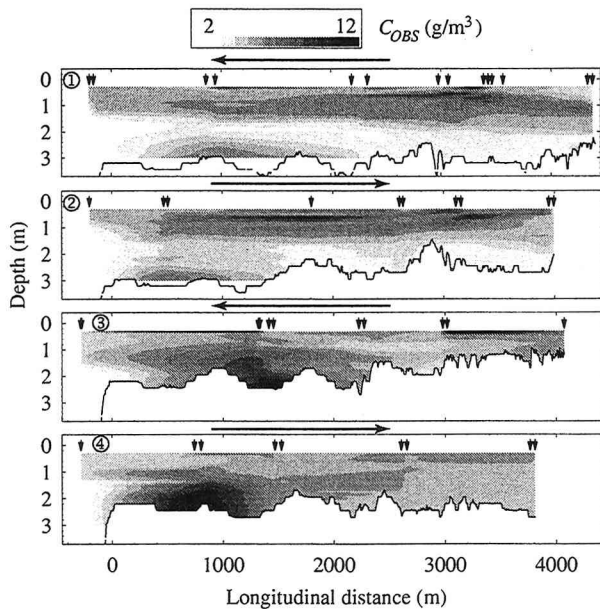


図-5 C_{OBS} の縦断面内分布

3. 結果および考察

(1) 水質の縦断面分布

図-4 に塩分の縦断面内分布の変化を示す。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ている。図中の番号は図-2に表示されている観測期間の番号に対応しており、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。また、水平方向の大きな矢印は船の進行方向を示している。図中に示した河床は、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。

図-4の左端からわかるように、河床は河口部から広島湾に向かって急激に低下している。観測期間中の祇園水門（上流端）の開度は0.1mであったため、放水路への流入淡水量は少ないものと推測されるが、観測を行った中潮では放水路内は成層が発達し、混合形態は弱混合型に近いことが図-4より確認できる。さらに、観測縦断面内の塩分差は大きく、河口から4,000m上流の表層で9psu、河口に近い下層で31psuの塩分を示している。図-4から、広島湾北部域の上層と同程度の塩分である30psuの塩水は、河口から2,500m程度上流まで遡上していることも窺える。

図-3(a)の関係を用いて濁度値から求めた重量濃度 C_{OBS} を図-5に示す。下げ潮期の①、②および上げ潮期の③、④では C_{OBS} の分布は大きく異なっている。すなわち、下げ潮期には上層の濃度が高く、上げ潮期には河口から上流1,000m付近の下層で濃度が高くなっている。ただし、観測時に*Gymnodinium mikimotoi*赤潮が発生していた。すなわち、上層では図-6に示されているように非常に高いクロロフィル蛍光光度を示していることから、上層の C_{OBS} にはこの影響が含まれていたものと考えられる。なお、観測期間中の最大濃度は、上げ潮期には河口から上流1,000m付近で発生している。

図-6はChl.a濃度の縦断面分布である。ただし、クロロテックの指示値のままで較正は行っていない。下げ潮期に、水面のやや下方で非常に高いクロロフィル蛍光光度がみられる。一方、上げ潮期には蛍光光度のピークは水面に移動しているが、これは上げ潮となった午後から降雨となり、日射が弱まったこと

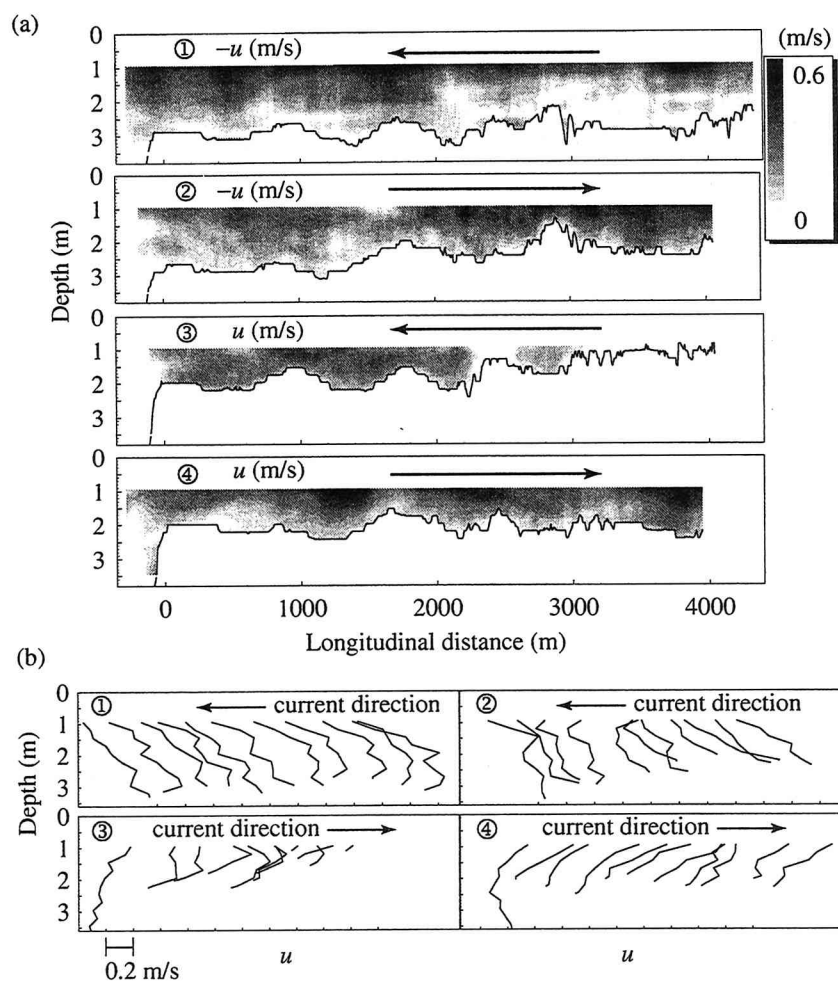


図-7 主流方向流速の (a) 縦断面内分布と (b) 鉛直分布

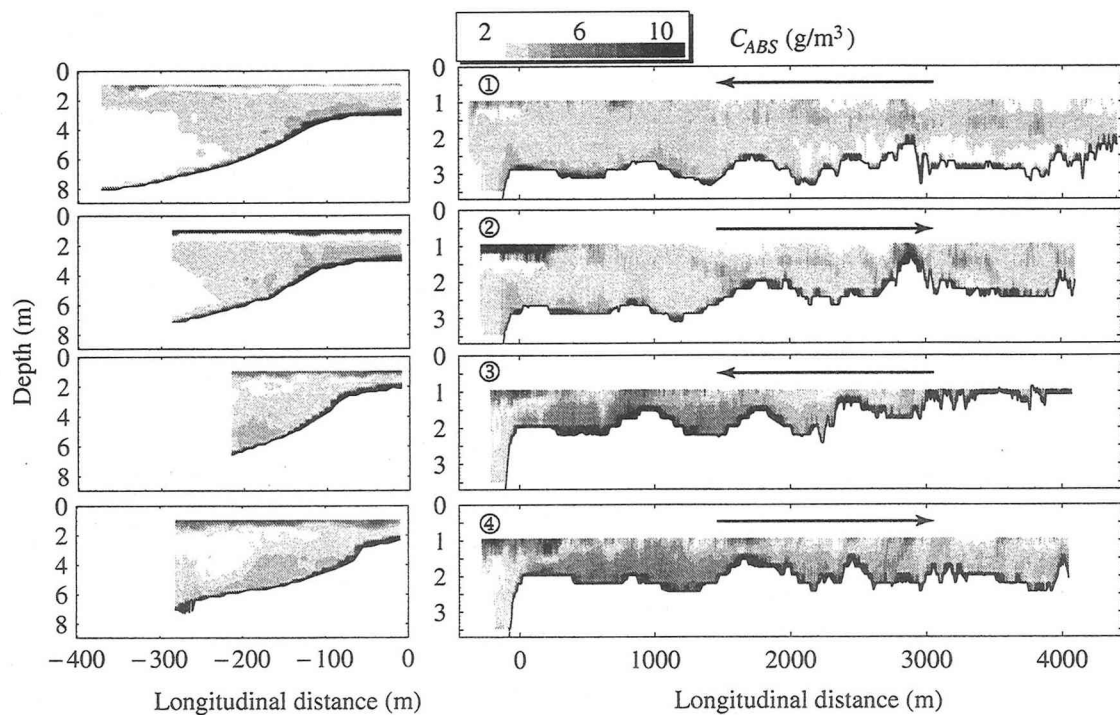


図-8 C_{ABS} の縦断面内分布

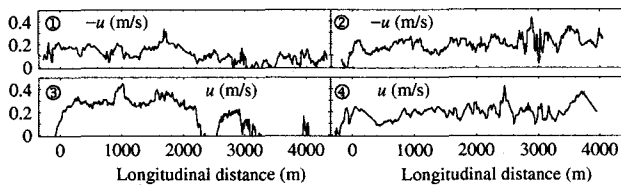


図-9 下層における u の縦断分布

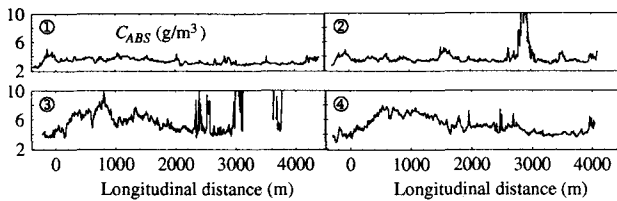


図-10 下層における C_{ABS} の縦断分布

が原因しているものと思われる。

(2) 流速と懸濁粒子濃度の縦断面内分布

NDP から得られた主流方向の流速 u の縦断面内分布および -100 m から $3,900\text{ m}$ まで 400 m 間隔で求めた各断面における流速の鉛直分布を図-7に示す。平均化時間は 150 秒 である。NDP の第1測定層の深さは 0.95 m で、水深の 90% までを表示している。上流方向を正としているが、図-7(a) では下げ潮期の流速の符号を反転させている。平均流速の鉛直分布の横軸上の目盛りは各流速分布の 0 を示している（各流速分布は 0.2 m/s づつ横にずらしてある）。図-4 に示した塩分分布からわかるように、上げ潮初期を除けば、成層が強いいため流速分布は直線的である。過去、大潮期に行った固定点での連続観測によれば、下げ潮期には直線的な流速分布を示し、上げ潮期には鉛直混合が活発なため流速分布はほぼ対数分布に従っていた⁶⁾。したがって、潮汐の大きさによって放水路内の水質と流動は大きく変化していると考えられる。図-7 からは確認が難しいが、後述するように、下層流速の最大値は下げ潮期より上げ潮期の方が大きい。

図-8 に NDP の体積後方散乱係数 S_v から推定した懸濁粒子濃度 C_{ABS} の縦断面内分布を示す。左側の図中には河口部の詳細が示されている。ただし、②の河口部上層の値は、NDP のトラブル時に観測されたものであり、正しくない。前述したように、上層には高密度の *Gymnodinium mikimotoi* が存在していたが、その散乱断面積は非常に小さいため、測定された S_v への寄与はほとんど無視できる⁸⁾。下げ潮の上流側では深さ 1.5 m 付近に濃度の高い部分がみられ、濁度計による濃度分布（図-5 参照）と同様に、河床へ向かっての濃度上昇はほとんどみられない。左に示した河口部をみると、懸濁粒子の濃度分布は斜面上の表層密度噴流に対応した分布を示しており、河川水とともに河道内から懸濁粒子が広島湾表層に流出している様子が窺える。

上げ潮期には図-5 の濁度計による結果と同様、河口から上流 $1,000\text{ m}$ 付近を中心に高濃度の領域が存在し、濃度が河床に向かって増加している。さらに、図-9 に示す下層（水深の 75% の深さ）流速の縦断分布をみると、上げ潮初期の③で大きな下層流速が発生している。これらのことから、上げ潮初期に発生する大きな下層流速によって河床堆積物の再懸濁が生じていることがわかる。図-9 に基づいて流速を 40 cm/s 、底面摩擦係数を 2.5×10^{-3} とすると、底面摩擦速度は 2 cm/s となる。底質粒子の密度と粒径を 2.0 g/cm^3 、 0.05 cm とするとシルズ数は 0.08 となり限界シルズ数を超過している。

下層の濃度分布を詳しくみるため、図-10 に水深の 75% の深さにおける濃度の縦断分布を示す。②の $3,000\text{ m}$ 付近と③の $2,500\text{ m}$ から上流域にみられる C_{ABS} の大きな値は、水深が浅すぎたため河床からの反射の影響を受けた結果である。下げ潮期に下層の懸濁粒子濃度は小さく、縦断方向の変化もあまりない。一方、上げ潮期では上述したように、河口から上流 $1,000\text{ m}$ 付近で最大濃度を示し、上流に向かって漸減していることがわかる。

図-11 は NDP によって得られた流速と濃度を掛け合わせて求めた懸濁粒子フラックスの縦断面内分布である。ただし、図-7(a) の流速と同様に下げ潮期のフラックスは符号を反転して表示されている。図-7 および図-8 から予想されるように、下げ潮期の①と②では上層のフラックスが大きく、下層には大きなフラックスはみられない。一方、流速が大きく再懸濁が生じている上げ潮初期の③では、下層に大きなフラックスが現れている。

NDP で測定されている水深 h の 90% から深さ 0.95 m までのフラックスを使って、単位幅当たりの懸濁粒子輸送量 q_s を次式で求めた。

$$q_s = \int_{0.95}^{0.9h} u(z) C_{ABS}(z) dz \quad (1)$$

q_s の縦断分布を図-12 に示す。ただし、図-11 と同様に下げ潮期のフラックスは符号が反転してある。下げ潮期では若干下流に向かって輸送量が大きくなる傾向があるので、懸濁粒子は河道内へ堆積することなく広島湾に流出しているものと判断される。一方、上げ潮初期に広島湾から遡上してくる懸濁粒子は少なく、上述したように再懸濁が活発な河口から $1,000\text{ m}$ 上流付近の輸送量が最も大きい。また、 $1,500\text{ m}$ 付近より上流に向かっては輸送量が減少傾向にあるので、河口近くで巻き上げられた懸濁粒子が上流に運ばれ堆積していることになる。

太田川工事事務所の平成8年度河床材料調査によれば、平均粒径は河口から上流に向かって一旦減少し再び増加している。今回の観測期間は短いので、潮汐による土砂収支を把握することは難しいが、平均粒径の最小は河口から $2,500\text{ m}$ 付近にみられ、これ

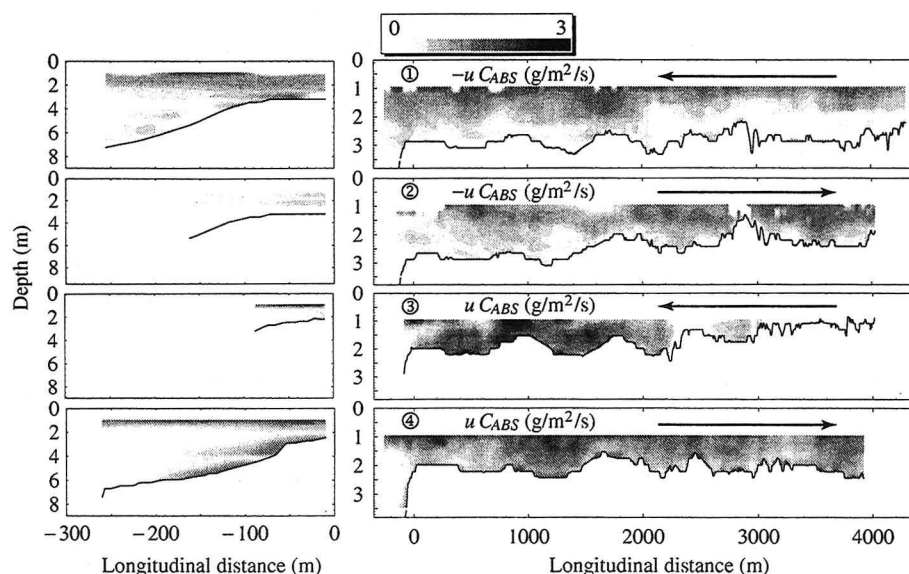


図-11 懸濁粒子の主流方向フラックスの縦断面内分布

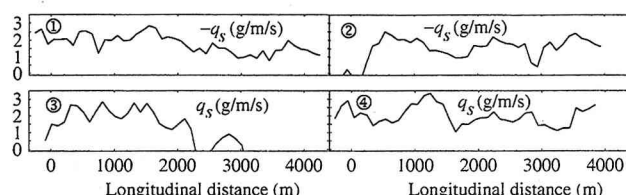


図-12 懸濁粒子の主流方向輸送量の縦断分布

は上述した上げ潮初期に発生する強い流れにより再懸濁されて上流へ運ばれた細かな粒子の堆積に対応していると考えられる。

4. おわりに

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、超音波ドップラー分布計 (NDP) を用い、縦断方向の航走観測を試みた。中潮の下げ潮期および上げ潮期に一往復ずつ行った観測から次の結果が得られた。

下げ潮期と上げ潮期とでは懸濁粒子の分布と輸送状態が大きく異なっている。とくに、河口から4,000 m までの観測区間では、下げ潮期に河床に向かって濃度が上昇することはほとんどなく、むしろ上層の方が濃度が高い傾向にある。したがって、上流から河口へ向かう懸濁粒子の輸送量は下層より上層の方が大きく、懸濁粒子が広島湾表層に流出している。

一方、上げ潮初期には河口の直上流から2,000 m 付近に渡って大きな下層流速が発生し、堆積物の再懸濁が起こっている。懸濁粒子濃度は河口の上流1,000 m 付近で最も高くなり、濃度は河床に向かって増加する鉛直分布を示す。懸濁粒子の上流方向への輸送量は1,500 m 付近から減少し、再懸濁粒子の堆積が起こっている。中潮時の潮汐による単位幅当たりの輸送量

は下げ潮と上げ潮で大きな差はなく、最大3 g/m/s 程度である。

潮汐振幅とともに河川流量や気象条件によって、懸濁粒子の動態は大きく変化し、感潮域の土砂収支などを考えるには長期にわたる観測が必要である。

参考文献

- 1) Riethmüller, R., et al.: Hydrographic measurements in the turbidity zone of the Weser Estuary, *Physical Processes in Estuaries*, Dronkers, J. and van Leussen, W. eds, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 332–344, 1988.
- 2) Kawanisi, K. and Yokosi, S.: Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer, *Contin. Shelf Res.*, Vol. 17(8), pp. 859–875, 1997.
- 3) 川西 澄, 水野博史, 松山幸彦, 長井 敏, 小谷 祐一: 広島湾北部域における底層懸濁粒子からの音響散乱特性—超音波ドップラー分布計による底層濁度と体積濃度の測定可能性について—, 海の研究, 第11巻, 第2号, pp. 285–293, 2002.
- 4) 末次忠司, 藤田光一, 諏訪義雄, 横山勝英: 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, 国土技術政策総合研究所資料, 第32号, pp. 167, 2002.
- 5) Lohrmann, A.: Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments, *Nortrk Technical Note*, 2001.
- 6) 川西 澄, 本宮和照: 河川感潮域における乱流と水質の鉛直構造の変動特性, 海岸工学論文集, pp. 346–350, 第49巻, 2002.
- 7) Puls, R., Kuehl, H. and Heymann, K.: Settling velocity of mud flocs: Results of field measurements in the Elbe and the Weser Estuary, *Physical Processes in Estuaries*, Dronkers, J. and van Leussen, W. eds, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 404–424, 1988.
- 8) 川西 澄, 松山幸彦: 内湾域に存在する海中懸濁粒子からの音響散乱, 海岸工学論文集, pp. 991–995, 第49巻, 2002.

(2002. 9. 30受付)