

太田川放水路における河川流量と 潮差変動に伴う浮遊砂泥の輸送特性

CHARACTERISTICS OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT WITH RIVER DISCHARGE AND TIDAL RANGE IN THE OHTA FLOOD WAY

川西澄¹・筒井孝典²・中村智史³・西牧均⁴

Kiyosi KAWANISI, Takanori TSUTSUI, Satoshi NAKAMURA 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)

⁴正会員 国土交通省中国整備局 太田川工事事務所所長 (〒730-0013 広島市中区八丁堀3-30)

Data of current, water density, and suspended sediment (SS) were collected for about 3 months in the Ohta floodway to clarify characteristics of SS transport in tidal estuary where flow and density conditions change significantly. The SS transport intermittently occurs, and most of that occurs just before and after lower low water slack. Moreover, it is found out that the long term variation of SS transport is concerned with river discharge and tidal range. Peaks of the SS transport on the flood tide are higher than those on the ebb tide during the spring tide. Spatial variation of SS transport is examined from observations at longitudinal three measurement positions, which are located at about 2.8km, 5.8km and 8.8km upstream from the mouth.

Key Words : *suspended sediment, tidal flood way, sediment transport, tidal current*

1. はじめに

河口域では淡水と海水の混合の状態に応じて独自の生態系が形成されており, その一部は豊富な水産資源として利用されている。また, 河川感潮域は内陸と外洋を結ぶ水上輸送において重要な位置を占め, 多くの感潮水域が港や航路として利用されている。そこでの生態系または洪水疎通能力や航路を維持するためには, 浮遊砂泥の輸送形態を把握することが重要となる。

感潮域における浮遊砂泥の輸送には, 洪水による輸送の他に, 平常時の潮汐による半日周期・半月周期の変動, 河川流量の季節変動などの季節的変動を受けると考えられる。

川西ら¹⁾は超音波ドップラー流速分布計(以下NDP)を利用して, 上げ潮と下げ潮での浮遊砂泥濃度の縦断分布と輸送状態の違いを航走観測によって調査している。その他に例えば川西ら²⁾, 末次ら³⁾, 清水ら⁴⁾がNDPを利用して浮遊砂泥輸送を調査している。

本研究は, 太田川放水路において行った, 約3ヶ月間の流速・水質の長期連続観測から, 浮遊砂泥が河川流量,

潮汐, 密度成層強度の変化によりどのような輸送形態を示すかを考察する。

2. 観測概要

(1) 観測地点

太田川放水路は広島デルタの最西部に位置している。図-1(a)に示すように, 河口から上流の市内派川との分岐点までの距離は約9kmで, 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。2004年3月中旬からは, 平常時, 祇園水門の3つのゲートのうち右岸側の1つだけを開度0.3mとし, 大芝水門は全開となっている。放水路に流入する河川流量は太田川流量の10%程度である。

図-1(b)は平成14年度太田川・小瀬川河床材料調査業務⁵⁾の音響データから求めた底面形状の縦断変化と観測地点を示してある。河道内の河床の傾斜は緩やかであるが, 河口の直ぐ沖側では急激に底面が低下している。

(2) 測定方法

河口から2.8km上流の地点(以下Sta. A)では, 2004年4

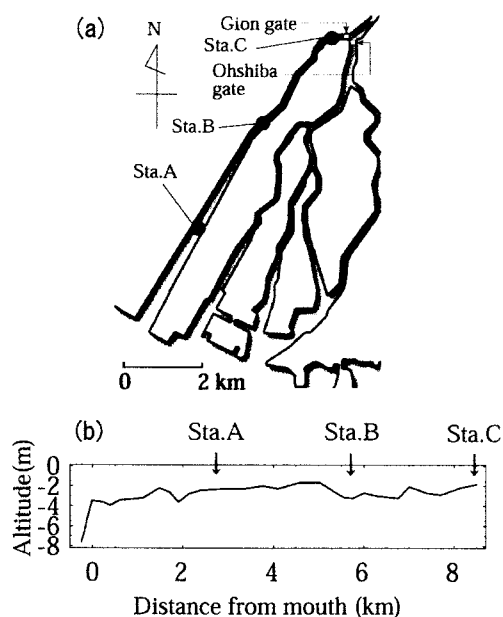


図-1 観測地点(a)と河床の縦断形状(b)

表-1 潮汐と河川流量

Case	Date	Tide	Discharge (m^3/s)
①	4/27~4/29	小潮	約200
②	5/16~5/18	大潮	約500
③	6/1~6/3	大潮	約200
④	6/9~6/11	小潮	約20
⑤	6/16~6/18	大潮	約20

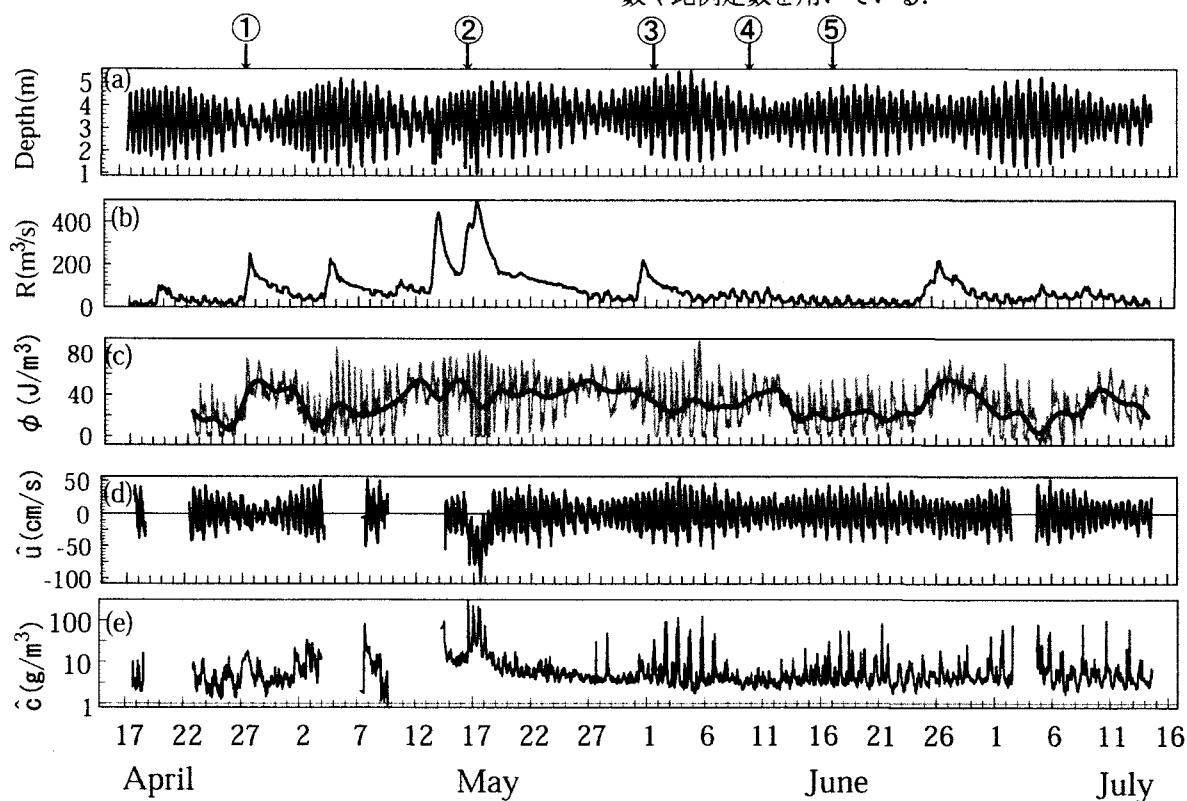


図-2 水深(a), 河川流量(b), 密度成層強度(c), 水深平均流速(d), 水深平均浮遊砂泥濃度(e)の経時変化

月17日から約3ヶ月間、超音波ドップラー流速分布計(Nortek社製の1.5MHz-NDP)をブイに係留した。NDPは測定層厚0.25m, 平均時間5分, 測定時間間隔20分で設定し、0.75m以深の流速と散乱強度の鉛直分布を測定している。また、表層と底層の海水密度を把握するために、表層(水深0.1m)に水温塩分計(アレック電子社製COMPACT-CT)を、底層(河床上0.4m)に多項目水質計(アレック電子社製TPMクロロテック)を設置し、連続測定した。測定間隔はそれぞれ2分, 10分とした。またセディメントトラップを河床上1mに設置し、沈降物の粒径を測定したところ、シルトと細砂から構成されており、 d_{50} は0.1mm程度であった。

河口から5.8km上流の地点(以下Sta. B)では、2004年6月5日から約1ヶ月間、アクアドッププロファイラー(Nortek社製の2.0MHz-AqPr)をブイに係留した。AqPrは測定層厚0.15m, 平均時間5分, 測定時間間隔30分で設定し、0.35m以深の流速・散乱強度の鉛直分布を測定した。

河口から8.8km上流(祇園水門から200m下流)の地点(以下Sta. C)では、2004年6月5日から約1ヶ月間、ワイパー式クロロフィル・濁度計(アレック電子社製Compact-CLW)を河床上0.4mに設置して、測定間隔10分で連続測定した。

NDP, AqPrから得られる体積後方散乱係数は採水サンプルのSSおよび濁度計の値との比較結果を用いて、浮遊砂泥濃度に変換した^{2), 6), 7)}。NDPとAqPrは周波数やタイプが異なるので、観測・実験から求めたそれぞれの減衰係数や比例定数を用いている。

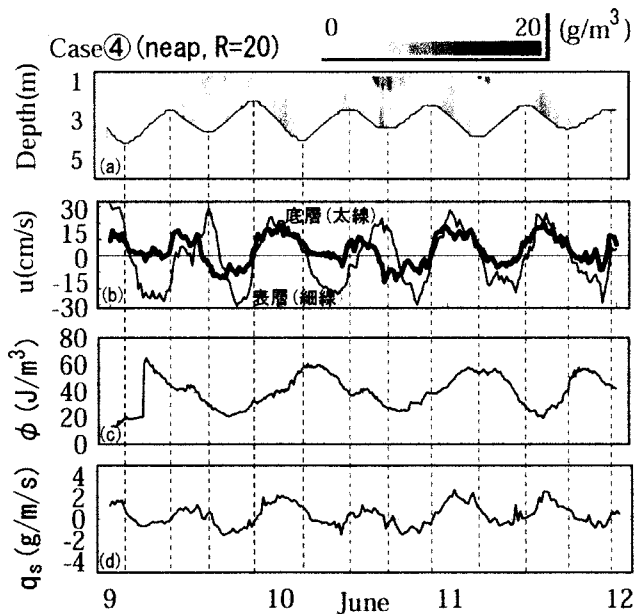


図-3 Case④における浮遊砂泥濃度(a),
表層・底層流速(b), 密度成層強度(c),
単位幅あたり浮遊砂泥輸送量(d)

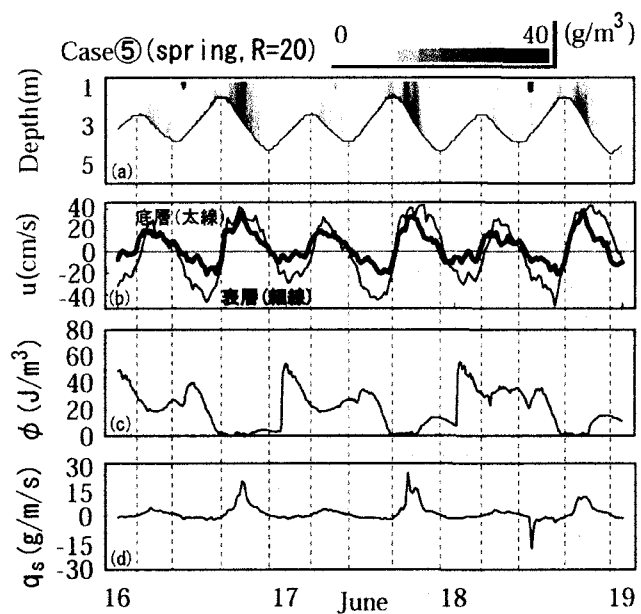


図-4 Case⑤における浮遊砂泥濃度(a),
表層・底層流速(b), 密度成層強度(c),
単位幅あたり浮遊砂泥輸送量(d)

3. 結果

(1) 密度成層, 流速, 浮遊砂泥濃度の長期周期変動

Sta. AにおけるTPMクロロテックの圧力センサーから求めた水深の経時変化を図-2(a)に示す。TPMクロロテックは河床上0.4mの高さにロープで係留していたが、5月13日と16日の出水時には、大きな流速と漂流物のためロープが傾き、実際的水深より小さい値となっている。

図-2(b)は祇園水門と大芝水門の分岐点の約5km上流にある矢口第一観測所の河川流量の経時変化である。なお、5月13日と16日の出水時には、祇園水門は全開になっている。

密度成層強度の経時変化を図-2(c)に示す。密度成層を表す指標として、Simpson・Hunter⁸⁾が提案した、成層状態にある水柱を一樣な状態にするのに要する単位体積あたりのエネルギー ϕ を用いた。

太田川放水路では平常時、潮流の流速分布による密度場の変動機構であるTidal Straining⁹⁾によって周期的に密度成層強度が大きく変動している¹⁰⁾。また太線で示した ϕ の日平均値は小潮期で増加し、大潮期で減少している。平常時の大潮期、小潮期における ϕ の日平均値はそれぞれ20.1J/m³、39.2J/m³で約2倍小潮期の方が大きい結果となっているが、大潮期の成層強度の変動は、短時間内で混合形態が大きく変わっていることがうかがえる。

図-2(d)は水深平均流速の経時変化を示している。流速は上流方向を正とした。ただし、波や漂流物によって流速計を設置したブイが横転し、測定できていない箇所

は除いている。水深平均流速は5月17日の出水時を除いては、大潮・小潮の半月周期変動がうかがえる。大潮期の水深平均流速の振幅は44.8cm/sで小潮期26.4cm/sの約1.7倍である。また水位変動と水深平均流速の変動の相関解析を行った結果、水深平均流速は水位変化に対して約2.6時間進んでおり、相互相関係数は0.93であった⁷⁾。

図-2(e)は水深平均浮遊砂泥濃度の経時変化を片対数グラフで示している。半月周期の変動を確認でき、出水時には300g/m³を超える高濁度状態の時間帯も存在する。平常時、大潮期においての一潮汐間平均浮遊砂泥濃度は6.6g/m³で小潮期の3.1g/m³より2倍以上大きくなっている。また出水時における一潮汐間平均浮遊砂泥濃度は約70g/m³であった。

(2) 密度成層, 流速, 浮遊砂泥濃度の半日周期変動

潮汐と河川流量の違いが浮遊砂泥の輸送に与える影響を把握するために、表-1に示すCase①～⑤に分類し、図-2(a)の上部にその観測期間を示す。

図-3から図-7はそれぞれCase①～⑤までの浮遊砂泥鉛直濃度分布(a)、表層・底層流速(b)、密度成層強度(c)、単位幅あたりの浮遊砂泥輸送量(d)の経時変化を示している。(b)の表層流速はNDPの測定第一層目である水深0.75mでの流速を細線で示している。底層流速は水深の80%における流速で、太線で示しており、ともに上流方向を正としている。(d)の単位幅あたりの浮遊砂泥輸送量 q_s は、NDPで測定されている水深 h の90%から0.75mまでのフラックスから次式で求めた。

$$q_s = \int_{0.75}^{0.9h} u(z)C(z)dz \quad (1)$$

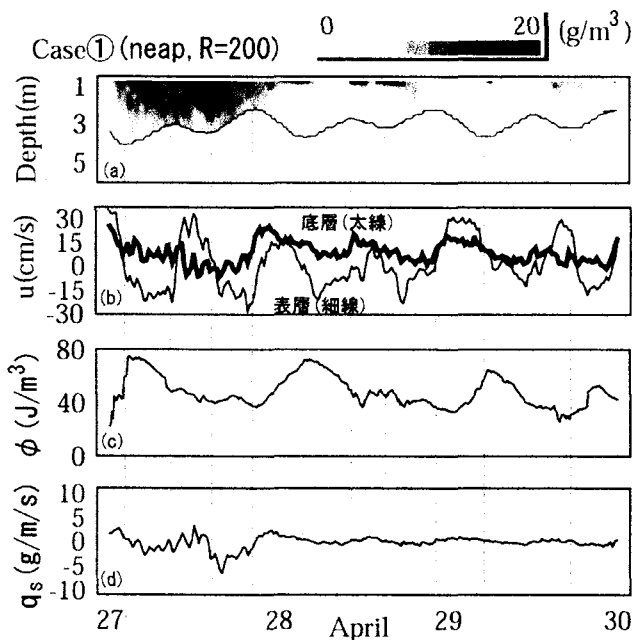


図-5 Case①における浮遊砂泥濃度(a),
表層・底層流速(b), 密度成層強度(c),
単位幅あたり浮遊砂泥輸送量(d)

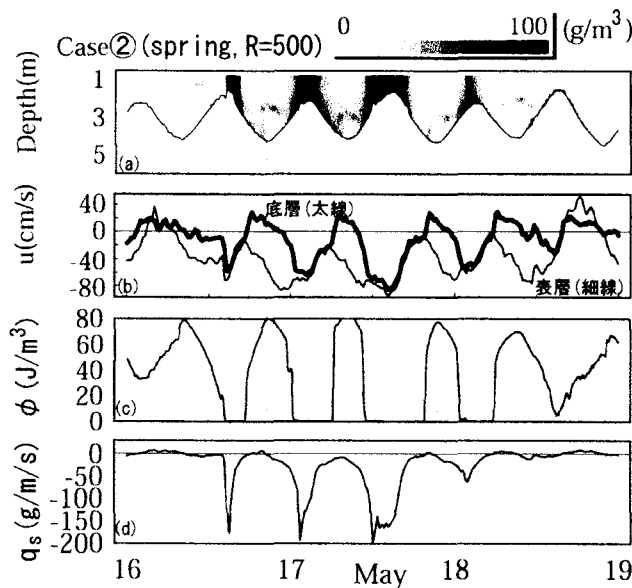


図-7 Case②における浮遊砂泥濃度(a),
表層・底層流速(b), 密度成層強度(c),
単位幅あたり浮遊砂泥輸送量(d)

まず河川流量が約 $20\text{m}^3/\text{s}$ 程度と小さく、小潮期のCase④、大潮期のCase⑤の結果をそれぞれ図-3、図-4に示す。図-3(a)より下げ潮期間と上げ潮期間の平均浮遊砂泥濃度はそれぞれ $1.4\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2.0\text{g}/\text{m}^3$ でその差は小さかった。図-3(b)より9日昼と10日昼の下げ潮時に表層流速が上流方向、底層流速が下流方向という通常の流れと逆転している流れ場が存在している。それは小潮期には成層強度が強く、渦粘性が小さくなり、風の影響を受けやすくなる。この時、風は放水路の上流方向の南南西に卓越して

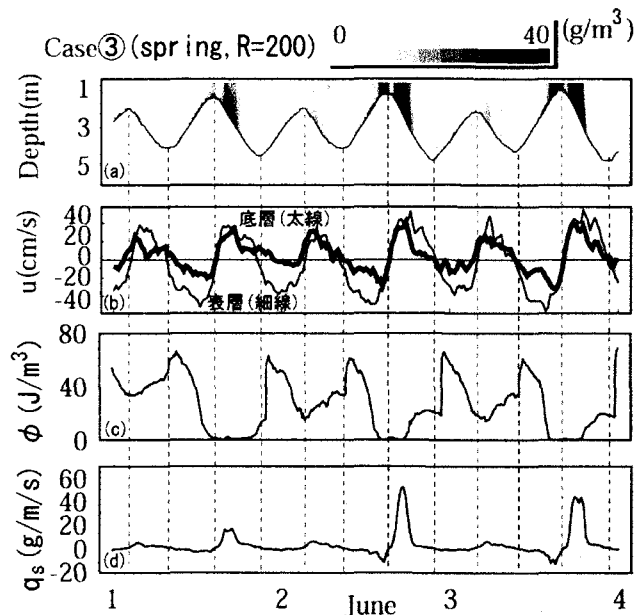


図-6 Case③における浮遊砂泥濃度(a),
表層・底層流速(b), 密度成層強度(c),
単位幅あたり浮遊砂泥輸送量(d)

おり、風速は $5\text{m}/\text{s}$ 程度であった。図-3(c)より密度成層強度は高高潮直後に最大、低高潮後に最小となる一日周期の変動がうかがえる。図-3(d)より小潮期の単位幅あたりの浮遊砂泥輸送量は多くて $4\text{g}/\text{m}/\text{s}$ 程度である。

図-4(a)より大潮期の下げ潮期間と上げ潮期間の平均浮遊砂泥濃度はそれぞれ $4.1\text{g}/\text{m}^3$ 、 $8.7\text{g}/\text{m}^3$ である。低低潮時には $40\text{g}/\text{m}^3$ 以上の高濁度が表れている。高低潮と低低潮時では浮遊砂泥濃度は大きく異なり、水深が小さい河川感潮域では日潮不等の影響が大きいことが分かる。図-4(b)より表層流速は上げ潮期と下げ潮期で大きさは同程度であるが、底層流速は下げ潮期間と上げ潮期間の平均値はそれぞれ $-6\text{cm}/\text{s}$ 、 $15\text{cm}/\text{s}$ と絶対値が2倍以上となり、上げ潮初期での底層流速は、表層流速と同程度の $30\text{cm}/\text{s}$ の大きな流速で強混合状態で遡上する。また、底層流速の波形は正弦波形からのゆがみが大きくなっており、干潮時の速度の時間変化が大きくなっている。図-4(c)より成層強度は低低潮に近づくにつれて急激に減少し、密度は鉛直一様となっている。下げ潮期間と上げ潮期間の平均成層強度はそれぞれ $25.4\text{J}/\text{m}^3$ 、 $11.0\text{J}/\text{m}^3$ であり、小潮期と異なり約2倍の開きがある。満潮後約3時間で成層強度が急激に大きくなり、表層を低塩分水が大きな流速で流れていることが分かる。

図-5、図-6では祇園水門は平常通りの開度であるが河川流量が約 $200\text{m}^3/\text{s}$ 程度に増加した場合の小潮期(Case①)、大潮期(Case③)を考察する。河川流量約 $20\text{m}^3/\text{s}$ 程度のCase④、⑤と比較して、Case①、③ともに浮遊砂泥濃度は増加しており、小潮期の図-5(a)では上げ潮、下げ潮に関わらず底層より表層での浮遊砂泥濃度が大きくなっている。また図-5(b)より上げ潮期の表層流速は

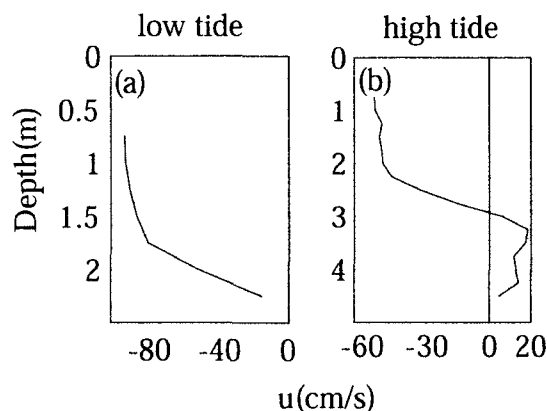


図-8 出水時の干潮時(a), 満潮時(b)の流速分布

4/28においてCase④の半分程度になっている。密度成層強度は大潮期・小潮期ともに河川流量が約 $20\text{m}^3/\text{s}$ 程度の場合の約1.3倍となっている。

図-6(c)の満潮後に生じる急激な成層強度の増加は、図-4(c)と比べ、発生時間が早まっている。これは河川流量増加に伴い、表層での流速が増し、低塩分水の到達時間が短縮されたためである。しかし河川流量が大きいかに関わらず、下流方向の浮遊砂泥輸送量は増加せず、高濁度が低低潮上げ潮初期に上流に輸送される。下流方向への輸送量は低低潮直前に最大となるが、それを超える上流方向への輸送が数時間後に生じている。祇園水門の平常操作時における浮遊砂泥輸送の大部分は大潮期の低低潮前後3時間に集中している。

図-7は河川流量 $400\text{m}^3/\text{s}$ 以上を記録した出水時の期間である。浮遊砂泥濃度は干潮付近で増加し、満潮で減少するといった潮汐の影響を受けている。佐藤ら¹¹⁾は洪水時に高解像度超音波ドップラー流速分布計を用いて、5cm間隔の流速の鉛直分布測定し、分布が対数分布則となることを確認している。しかし河口域では洪水時においても、潮差の大きい大潮であれば、対数分布則にのらず、図-8(b)に示すように上げ潮期において表層は下流方向へ、底層では上流方向へ流れる分布形を示す。図-7(b)からも出水時には表層流速は常に下流向きで、底層流速は満潮付近に 20cm/s 程度で遡上している。その時に密度成層強度が急増する。図-7(a)の満潮付近に確認できる中層付近の帯状模様は塩分躍層による散乱と考えられる。塩分勾配と速度勾配が共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こる¹²⁾。つまり実際の浮遊物質のみによる散乱より大きく見積もってしまうことになるが、出水時における浮遊砂泥濃度と比べれば無視できる程度である⁷⁾。図-7(d)の単位幅あたりの浮遊砂泥輸送量は平常時同様、干潮直前において下流方向への輸送量が極大となり、干潮後数時間は下流方向へ輸送されている。しかし満潮に近づき底層流速が上流向きになると、表層での下流方向輸送と底層での上流方向輸送がほぼつりあっている。つまり下流方向の高濁度輸送は、

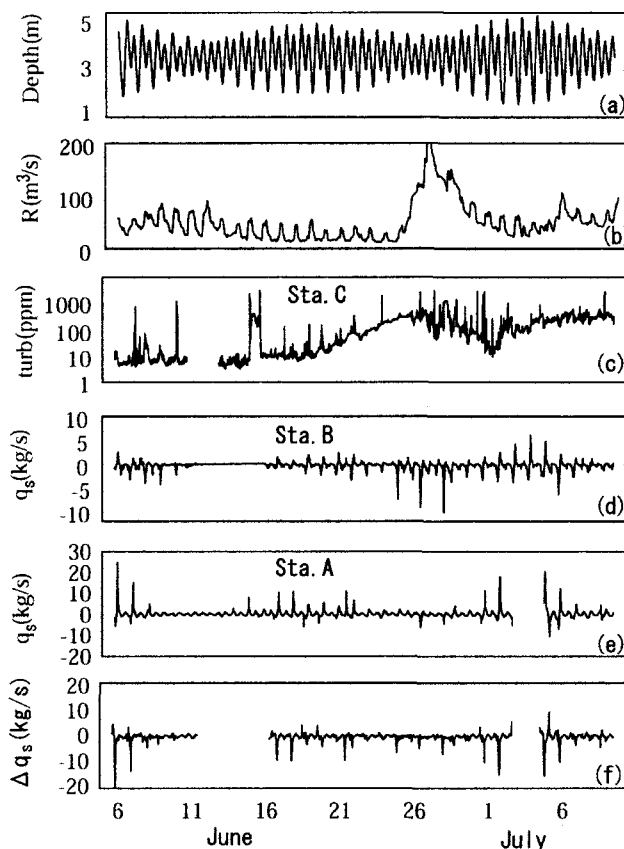


図-9 水深(a), 河川流量(b), Sta. Cでの濁度(c), Sta. Bでの浮遊砂泥輸送量(d), Sta. Aでの浮遊砂泥輸送量(e), Sta. A, B間での浮遊砂泥の収支量(f)

半日周期で行われ、大きさは 200g/m/s もの大きなインパクトを持っている。山崎ら¹³⁾は融雪期に鶴川でSS濃度が 5000mg/l にも達するような濁水が海域に流出していることを確認している。

(3) Sta. A, B地点間における浮遊砂泥輸送量の収支

4月17日からのSta. Aでの測定に加えて、6月5日からはSta. B, Sta. Cにおいても約1ヶ月間測定を行った。しかし、それぞれの地点で測定できていない期間があったため、3地点とも測定できた期間は3週間程度である。

図-9(a), (b)は図-2でも示したSta. Aの水深と河川流量である。図-9(c)はSta. Cにおける濁度を片対数グラフで示している。6月24日から27日までの降雨により濁度が上昇しており、Sta. C付近では潮汐による濁度の変動はほとんど起こらず、降雨量、河川流量といった要因に支配されている。

図-9(d), (e)はそれぞれSta. B, Sta. Aにおける浮遊砂泥輸送量である。Sta. BでのAqPrは測定第一層が 0.35m とSta. Aの第一層目 0.75m と異なるため、比較がしやすいように、ともに第一層目より上層ではフラックス一様と仮定し、水深の90%から水面までのフラックスを積分し、それぞれの地点での川幅をかけた値を q_s (kg/s)とおいた。

Sta. Aの川幅はSta. Bの約2倍である。図-9(d)よりSta. Bでは6月26日辺りで降雨の影響により下流方向輸送が卓越している。7月初旬の大潮期では図-4で示した大きな上流方向輸送が一日周期で現れている。しかし図-9(e)からも分かるように、全体的に上流方向の浮遊砂泥輸送量は、下流側のSta. Aの方が大きい値を示している。図-9(f)はSta. Bでの浮遊砂泥輸送量からSta. Aの浮遊砂泥輸送量を差し引いた量である。 Δq_s はSta. A, B間の収支量を示しており、上げ潮期に負の値をとるということは、遡上した浮遊砂泥がSta. A, B間で堆積していることを示している。川西ら⁷⁾は、中潮期、太田川放水路の河口から1.2km上流で、河床上5cmにおいての流速、底面せん断応力、侵食速度、SSを測定しており、干潮後2時間程度で河床材料の再懸濁が発生し、上流方向へ輸送されること、また縦断移動観測より河口から約4km上流までの区間では下げ潮期に浮遊砂泥が河床にほとんど堆積することなく、広島湾表層に流出していることを報告している。図-9(f)より、データが欠損している区間があるものの、大潮期の上げ潮時にSta. A, B間での堆積が生じていることが分かる。また、欠損区間を除いた6/16~7/2の連続測定区間(約2週間)の堆積厚は、土粒子密度を 2.5g/cm^3 とし、Sta. A, B間に一様に堆積すると仮定すると、0.5mmである。

5. おわりに

河川流量や潮差変動によって流れ場や密度場が時空間的に大きく変動する河川感潮域において浮遊砂泥の輸送特性を把握するため、太田川放水路にて約3ヶ月間、流速、密度の連続観測を行った。

潮汐の半月・半日周期変動によって密度成層、流速、浮遊砂泥濃度は大きく変動し、浮遊砂泥輸送は間欠的に行われていた。

平常時の浮遊砂泥輸送の大部分は、大潮期の低低潮前後3時間に集中している。太田川放水路では、祇園水門のゲートを全開にしない限り、河川流量が増えても一潮汐間で平均すれば浮遊砂泥は上流方向に輸送される。

洪水時の浮遊砂泥の輸送形態は、上げ潮期には底層での上流方向輸送量と表層での下流方向輸送量がほぼつりあっていた。下げ潮期になると表層と底層が一様となると広島湾に流出する。また洪水時の輸送量は、平常時、

大潮期の低低潮前後の輸送量の数十倍のインパクトがある。

Sta. A, B間における二点間の浮遊砂泥輸送量の収支より、大潮、上げ潮期に遡上した浮遊砂泥の多くはSta. A, B間で堆積傾向にある。

参考文献

- 1) 川西 澄, 本宮和照, 西牧 均: 河川感潮域における懸濁粒子の航走観測, 水工学論文集, 第47巻, pp. 967-972, 2003.
- 2) 川西 澄, 水野博史: 浅水感潮域における水中音響散乱体の変動特性, 水工学論文集, 第45巻, pp. 1045-1050, 2001.
- 3) 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.
- 4) 清水健司, 入江光輝, 石川忠晴: 利根川感潮域における乱流と底泥の巻き上げに関する現地観測, 水工学論文集, 第48巻, pp. 769-774, 2004.
- 5) アイドールエンジニアリング株式会社: 平成14年度太田川小瀬川河床材料調査業務別冊参考資料, 平成15年3月.
- 6) 川西 澄, 松山幸彦: 内湾域存在する海中懸濁粒子からの音響散乱, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 991-995, 2002.
- 7) 川西 澄, 筒井孝典: 河川感潮域における流動と懸濁粒子の動態, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 411-415, 2003.
- 8) Simpson, J.H. and J.R.Hunter: Fronts in the Irish Sea, *Nature*, Vol.250, pp.404-406, 1974.
- 9) Simpson, J.H., Brown, J., Matthews, J. and Allen, G.: Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification, *Estuaries*, Vol. 13(b), pp.125-132, 1990.
- 10) 川西 澄, 筒井孝典: 浅水感潮域における密度成層の変動特性, 水工学論文集, 第48巻, pp. 781-786, 2004.
- 11) 佐藤慶太, 二瓶泰雄, 木水啓, 飯田裕介: 洪水流観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の適応〜江戸川を例にして〜, 水工学論文集, 第48巻, pp. 763-768, 2004.
- 12) Seim, H.E: Acoustic Backscatter from Salinity Microstructure, *American Meteorological Society*, Vol16, pp.1491-1498, 1999.
- 13) 山崎真一, 山下俊彦, 渡邊康玄: 融雪期に鶴川から沿岸海域に供給された浮遊物質の挙動, 水工学論文集, 第46巻, pp. 911-916, 2002.

(2004. 9. 30受付)