

太田川放水路における塩水遡上と 懸濁粒子の輸送特性

TRANSPORT CHARACTERISTICS OF SALT WATER AND SPM IN THE OHTAGAWA DIVERSION CHANNEL

川西 澄¹・胡桃田哲也²・Mahdi RAZAZ³・水野雅光⁴・福岡捷二⁵
Kiyosi KAWANISI, Tetsuya KURUMIDA, Mahdi RAZAZ,
Masamitsu MIZUNO and Shouji FUKUOKA

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

² 学生員 広島大学大学院博士課程前期 工学研究科社会環境システム (同上)

³ 学生員 広島大学大学院博士課程後期 工学研究科社会環境システム (同上)

⁴ 正会員 国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所 (〒730-0013 広島市中区八丁堀 3 番 20 号)

⁵ フェロー会員 工博 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

Long-duration observations of salinity distribution were conducted at 4.8 km upstream from the mouth of the Ohtagawa diversion channel where flow and density conditions change significantly. In addition, measurements of tidal current and suspended particulate matter (SPM) were carried out, using an acoustic Doppler current profiler. The long deployment periods allowed us to examine the effect of a flood incident, wind, mean depth, and both semi-diurnal and neap/spring aspects of tides. The influences of the river discharge, wind, tidal range, and mean depth on the transport of saltwater and SPM were examined by the regression analysis. The direction of the mean SPM transportation was toward upstream for the restricted freshwater discharge. The upstream SPM flux increased with the increasing tidal range. Conversely, the intrusion of salt water was suppressed by the tide.

Key Words: saltwater intrusion, SPM, stratification, density current, tidal flow, wind-driven current, estuaries

1. はじめに

広島市の太田川放水路は、最大潮差が 4m と大きく、平均水深と潮差が同程度であることに加え、放水路上流端に位置する祇園水門の操作によって著しい非定常性を示す水域である。太田川放水路の河岸沿いには良好な干潟が形成されており、中流域にはフクド、ハマサジなどの塩生植物の群落がみられる。

太田川放水路では今後の河川整備のために、治水上の問題に加えて河川環境の把握と評価が求められているが、感潮河川を適切に保全していくためには、時々刻々大きく変動している塩分と流動を長期にわたって観測し、様々な時間スケールの変動と変動要因を把握しておく必要がある。著者らはこれまでに放水路下流部において ADP 観測を行うとともに、数値モデルを用いて風と潮汐が放水路内の塩水遡上や懸濁粒子の輸送に与える影響を検討してきた¹⁻³⁾。

本論文では出水期と平水期に放水路中流部で 4 ヶ月にわたる塩分の鉛直分布の連続観測を 2 回実施するとともに、2 ヶ月間の ADP による流速分布の測定を行い、塩水遡上、残差流と懸濁粒子輸送量の長期変動特性と変動に対する河川流量、風、潮差と平均水深の影響を明らかにする。

2. 観測地点と観測方法

広島市西部に位置する太田川放水路の河口から約 4.8 km 上流で塩分・水温と流速の鉛直分布の連続観測を行った。観測地点を図-1 に示す。太田川は河口から約 9 km 上流で放水路と市内派川に分派しており、放水路上流端には祇園水門、市内派川側には大芝水門が設置されている。平常時、祇園水門は 3 つのゲートの内、右岸側のゲートのみが開度 0.3 m に設定されており他の 2 つは閉じられている。一方、市内派川

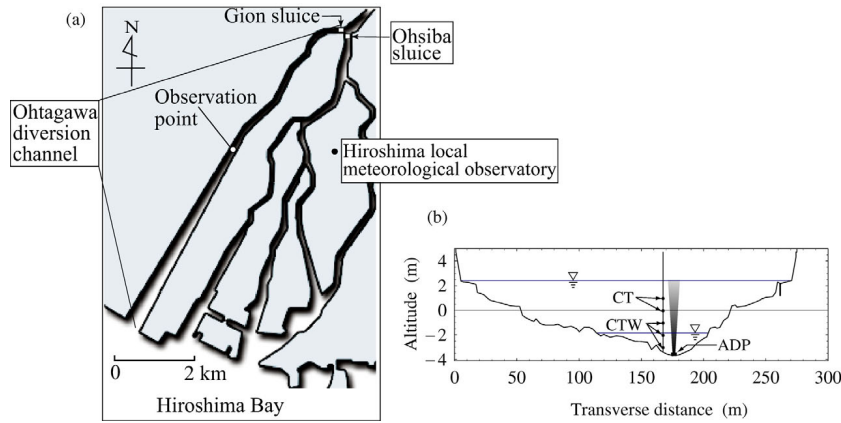


図-1 観測地点 (a) と水路横断面形および測器の配置 (b)

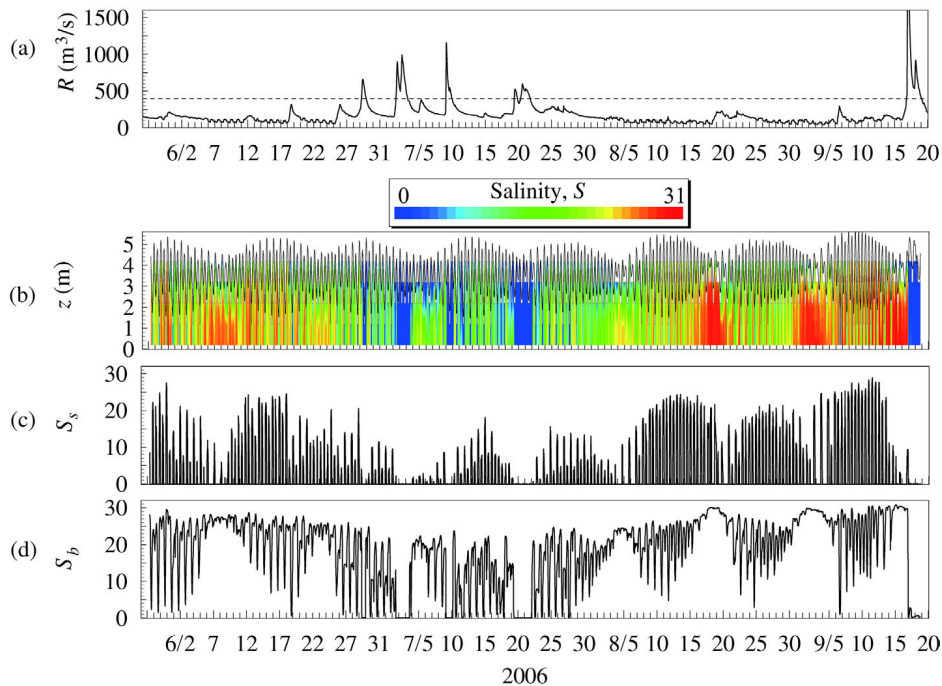


図-2 出水期における河川流量 (a), 塩分の時空間分布 (b), 上層塩分 (c) と底層塩分 (d) の経時変化

側の大芝水門は全開となっている。感潮域であるため、正確な放水路への流入流量データはないが、平常時、太田川流量の約 10% が流入していると考えられている。太田川流量が $400 \text{ m}^3/\text{s}$ を超えると水門は全開となり太田川流量の半分強が放水路に流入する。

鉛直方向に等間隔で歩道橋橋脚に設置した 5 個の水溫塩分計と水圧式水位計および大気圧計により、水溫、塩分、水位を 20 分間隔で連続測定した。水溫塩分計の河床からの設置高さは 0.2, 1.2, 2.2, 3.2, 4.2m である。河床側 3 点の塩分測定には生物付着などの汚れの影響を防ぐためにワイパー式水溫塩分計（アレック電子製 CTW）を用いた。測定期間は 2006 年 5 月 25 日 9 時～9 月 18 日 18 時と 2006 年 10 月 25 日 12 時～2007 年 2 月 28 日 10 時である。

さらに、2006 年 11 月 28 日 11 時から 2007 年 1 月 22 日 10 時の間は図-1(b) に示すように、水溫塩分計を取り付けた橋脚から右岸側に 8 m 離れた最深部の河

床上に、超音波の周波数が 3 MHz の ADP を設置し、流速と散乱強度の鉛直分布を連続測定した。平均時間は 1 分、セル厚は 15 cm、測定間隔は 10 分とした。図-1(b) に示す 2 つの水面の位置は観測期間内に測定された最低水位と最高水位の位置を示している。

3. 塩分の変動特性

(1) 塩分の短期変動

図-2 と図-3 に出水期と平水期の観測結果を示す。上から順に、矢口第 1 観測所（分派点の約 5 km 上流）での河川流量、塩分の鉛直分布、河床から 4.2 m と 0.2 m における塩分の経時変化である。ここで、 z は河床からの高さ、 S_s と S_b はそれぞれ河床から 4.2 m と 0.2 m の高さにおける塩分である。また、図-2, 3(b) の黒線は水面の位置を表している。なお、各国際委員会（SCOR, IAPSO, ICES, IOC）の勧告により塩分には単位を付けないこととなっている。

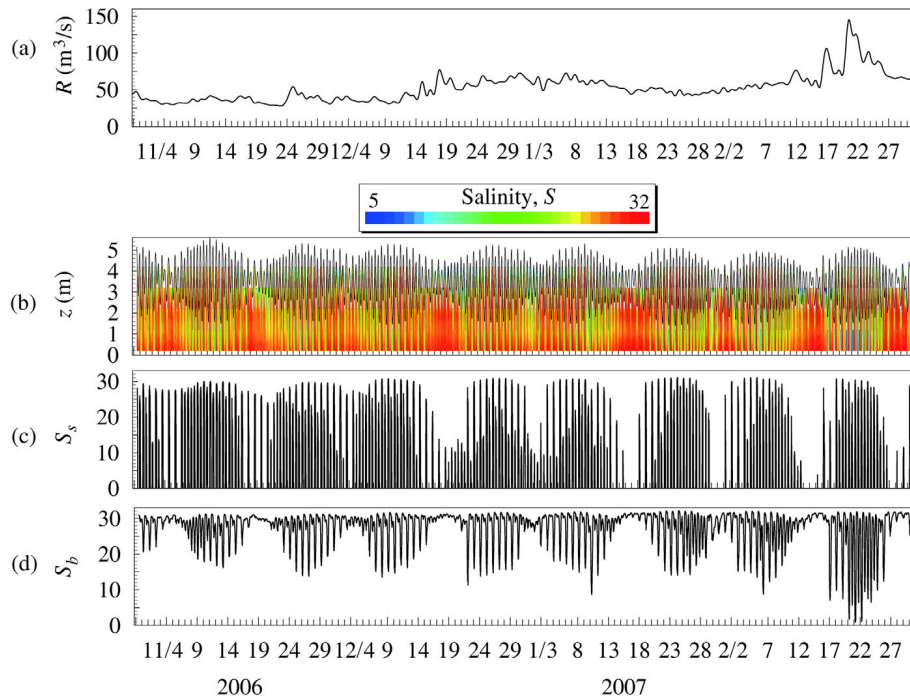


図-3 平水期における河川流量 (a), 塩分の時空間分布 (b), 上層塩分 (c) と底層塩分 (d) の経時変化

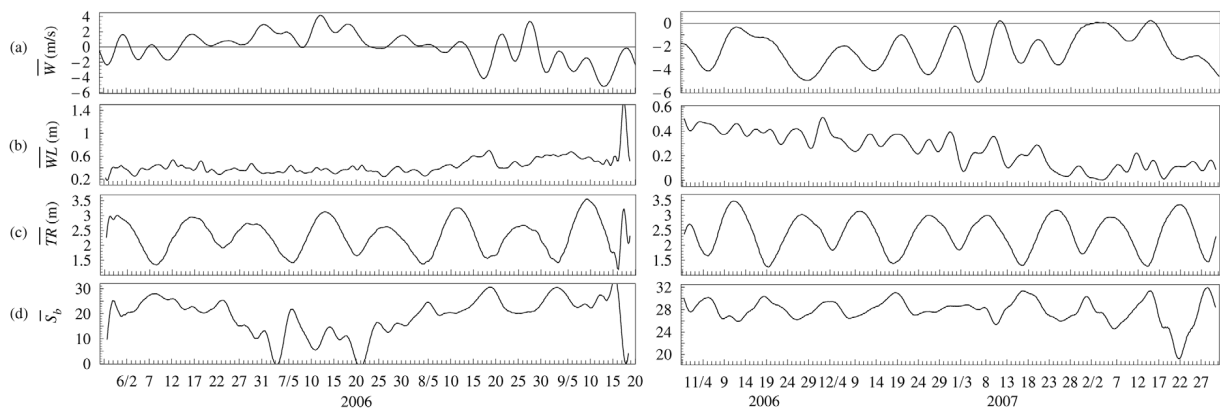


図-4 水路に沿った平均風速 (a), 平均水位 (b), 平均潮差 (c) と底層平均塩分 (d) の経時変化

最大潮差が約4mと大きいため、図-2, 3(b)の塩分鉛直分布には水柱全体の塩分を測定できていない時間帯が存在していることに注意する必要がある。また、図-2, 3(c)に示す S_s が0となっているのは、出水時を除けば、センサーが干出していることが原因である。図-2の観測期間内に祇園水門が全開となる $400\text{m}^3/\text{s}$ を超える出水が5回起きている。図-2(d)の底層塩分をみると、祇園水門が全開となっている期間では潮汐位相にかかわらず塩分は0となっており、塩水は観測地点まで到達していない。水門操作に対する底層塩分の応答はかなり速く、水門が平常時の状態に戻ると、上げ潮期の6時間で底層塩分は0から20程度の値まで回復している。上層塩分の回復は底層に比べると遅く、出水前の値に復帰するのに20日程度を要している。

既に報告したように¹⁾、大潮期の塩分は潮汐位相によって大きく変動しており、底層の塩分は低低潮

時にスパイク的に減少している。また、後述するように日平均塩分は大潮期より小潮期の方が高い。

(2) 底層塩分と成層強度の長期変動と変動要因

塩分の長期変動を引き起こす主な要因として、河川流量、風、潮差、平均水深が考えられる。ウェーブレットフィルターを用いて日周潮以下の変動を除いた長周期変動(日平均値)の経時変化を図-4に示す。上から順に、平均風速 $\overline{W}$ 、平均水位 $\overline{WL}$ 、平均潮差 $\overline{TR}$ 、底層の平均塩分 $\overline{S}_b$ である。風速 W は広島気象台の風速・風向データを放水路に沿った風速に変換したもので、風向は放水路上流方向を正としている。図-4(a)の平均風をみると、夏季は上流方向、冬季は下流方向の風が卓越している。平均水位の経時変化には、9月が最も高く2月に最低となる年周期の変動に加え、8月と9月中旬には台風の接近にともなう気圧低下に対応した変動が存在している。

表-1 底層塩分と成層強度の変動に対する重回帰分析の結果
(出水期：2006/5/25-9/18)

	β_1	β_2	β_3	β_4	r^2
$\bar{S}_b$	-4.41	-2.71	-1.25	2.84	0.629
$\bar{\phi}$	-4.06	-0.907	-5.63	0.849	0.41

表-2 底層塩分と成層強度の変動に対する重回帰分析の結果
(平水期：2006/10/25-2007/2/28)

	β_1	β_2	β_3	β_4	r^2
$\bar{S}_b$	-0.648	-0.197	-1.59	0.076	0.747
$\bar{\phi}$	3.71	0.982	-2.68	2.14	0.37

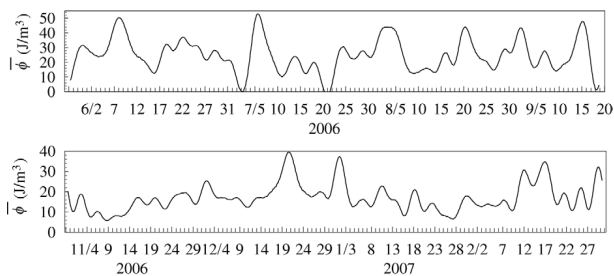


図-5 成層強度の経時変化

図-4(d)の平均底層塩分の経時変化をみると、図-2(a)に示されている出水にともなう大きな減少のほかに、潮差の増減に対応した変動が明瞭にみられる。すなわち、小潮期は大潮期に比べ高塩分となっていることがわかる。これは主に、潮流の強さに応じて鉛直渦動粘性係数が増減するためで、大潮期は鉛直渦動粘性係数が大きくなるため塩水遡上が抑制されている。

上流方向の風によって誘起される吹送流は底層の塩水遡上を妨げ、下流方向風は逆に遡上を助長する。風の影響度は潮差にも関係し、小潮期に顕著であることがわかっている¹⁾。Goodrich⁴⁾によるChesapeake湾における観測では、風による流れが密度流より一般的に大きく、特に風が発生している間は潮汐流と同じオーダーになり得ることが示されている。

底層塩分に対する潮差や風などの影響度合いを調べるために、(1)式の線形回帰式を用いて重回帰分析を行った結果を表-1および表-2示す。

$$\hat{S}_b = \beta_0 + \beta_1 \tilde{R}_G + \beta_2 \tilde{W} + \beta_3 \tilde{TR} + \beta_4 \tilde{WL} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{S}_b$ は日平均底層塩分 $\bar{S}_b$ の回帰推定値、 R_G は放水路流入量である。 $\tilde{\quad}$ は標準偏差による基準化を意味している。したがって、偏回帰係数 β_i の絶対値は各要因(説明変量)の影響度合いを示すことになる。前述したように、放水路に流入する河川流量は祇園水門の操作により大きく変化する。感潮域であるので、放水路流入量 R_G の正確な値は不明で

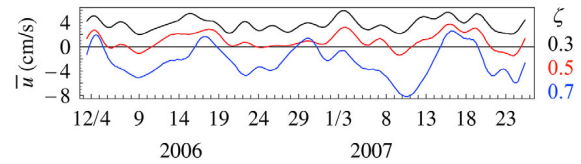


図-6 残差流速の経時変化

あるが、太田川河川事務所の計画値に従って、矢口第一流量観測所の測定値 R から次式で推定した。

$$R_G = \begin{cases} 0.1 R & \text{for } R < 400 \text{ m}^3/\text{s} \\ 0.53 R & \text{for } R \geq 400 \text{ m}^3/\text{s} \end{cases} \quad (2)$$

表-1、表-2中の r^2 は寄与率、 ϕ は後述する成層強度パラメーターである。表-1の出水期の結果を見ると、底層塩分に最も大きく影響しているのは流入量で、平均潮差の影響度は最も小さい。平均風と平均水位は同程度の影響度をもっている。河川流量、上流方向風、潮差の増加は塩水遡上を妨げ、平均水位の増加は塩水遡上を強めている。これら4つの説明変量によって底層平均塩分変動の約63%が説明される。風と潮差の影響は数値モデルで示された結果³⁾と一致している。

表-2に示すように、平水期における潮差の影響の仕方は出水期と同様であるが、潮差の影響度が4つの説明変量の中で最も大きくなっている点が異なっている。平均水位は2月に向かって約0.5m減少しているが、この影響はほとんどない。回帰式の寄与率は出水期より大きく、底層平均塩分変動の約75%を説明できている。

成層強度パラメーターの長周期変動 $\bar{\phi}$ を図-5に示す。 ϕ は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である^{1,5)}。 $\bar{\phi}$ の経時変化には潮流による鉛直混合の影響を受けて潮差に対応した変動がみられる。さらに、祇園水門が全開となる出水時は、水柱全体の塩水がフラッシュされているので密度成層は消滅している。

表-1、表-2に示す(1)式と同様な回帰式を用いた $\bar{\phi}$ に対する回帰分析の結果を見ると、出水期と平水期では河川流量と風が密度成層強度に与える影響が逆になっていることがわかる。すなわち、適度な河川流量(水門が平常状態)は密度成層を強めるが、水門が全開となって流入流量が大きくなりすぎると、塩水が遡上できなくなるため、密度成層は消滅する。

風速は表層における淡水の移流と鉛直混合をコントロールするが、河川流量が少なく北風が卓越する冬季には、風は鉛直混合を通して密度成層の強さに影響しているため、 β_2 が正となっていると考えられる(北風による鉛直混合により成層強度が減少)。

4. 平水期における残差流の変動と塩水、懸濁粒子の輸送特性

(1) 残差流の変動

表-3 残差流と移流フラックスの変動に対する重回帰分析の結果
(平水期：2006/11/28-2007/1/22)

	β_1	β_2	β_3	β_4	r^2
$\bar{u}_{0.3}$	-0.019	-0.125	-0.74	-0.261	0.512
$\bar{u}_{0.5}$	0.062	-0.471	-1.16	-0.118	0.712
$\bar{u}_{0.7}$	0.024	-1.04	-2.1	0.275	0.624
$\bar{S}_f$	-0.05	-0.02	-0.686	-0.16	0.64
$\bar{s}_v$	-0.16	-0.671	2.85	0.311	0.848 0.898
$\bar{s}_v \bar{u}_b$	-14.8	-10.9	52.7	-19.8	0.786 0.936

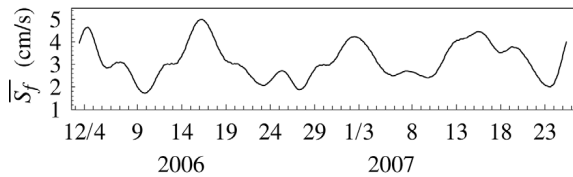


図-7 海水遡上速度の経時変化

図-6 に相対高さ $\zeta (= z/h) = 0.3, 0.5, 0.7$ における残差流の経時変化を、回帰分析の結果を表-3 に示す。本論文では、日周潮以下の周期変動を除いた主流方向流速の日平均値を残差流としている。

下層 $\zeta = 0.3$ では観測期間を通して残差流は上流方向である。鉛直方向の流速差は潮流による鉛直混合の強さに応じて大潮期に小さく、小潮期に大きくなっている。

いずれの相対高さ ζ でも潮差の影響が最も大きく、数値計算結果³⁾と同様、潮差が小さくなるほど上流方向の残差流が大きくなっている。こうした残差流(密度流)の変動が、前述した塩分の長期変動を引き起こしている主要原因であると考えられる。

(2) 海水遡上速度の変動

塩水中の海水の割合は、海域の平均塩分を S_0 とすれば、 S/S_0 で求められる⁶⁾。広島湾の平均的な塩分は 32.5 であるから、底層における広島湾起源の海水の移流(遡上)速度は次式で評価できる。

$$S_f = u_b \frac{S_b}{32.5} \quad (3)$$

ここで、 u_b は $z = 0.2\text{m}$ での底層流速である。

図-7 に (3) 式で求めた底層における海水の平均遡上速度の経時変化を示す。底層における塩分と残差流はともに潮差と逆相関にあるので、平均遡上速度の経時変化には大潮-小潮周期が明瞭にみられる。観測期間の平均遡上速度は 1.5~5 cm/s の範囲で変動している。表-3 の回帰分析結果をみると、平水期には説明変量の中で潮差が平均遡上速度に与える影響が圧倒的に大きいことがわかる。

(3) 懸濁粒子の輸送特性

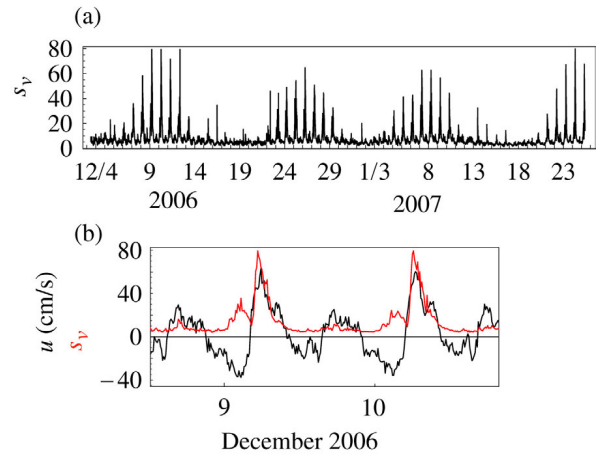


図-8 体積後方散乱係数(懸濁粒子濃度)の経時変化

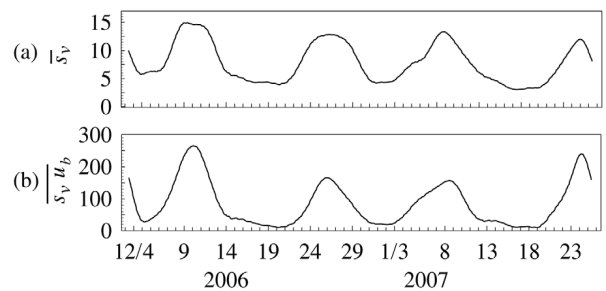


図-9 底層における体積後方散乱係数(懸濁粒子濃度)とフラックスの長期変動

懸濁粒子の粒径が大きく変動しなければ、超音波の体積後方散乱係数は懸濁粒子の体積濃度に比例する⁷⁾。ADP の散乱強度からノイズレベルを除き、音波の伝播損失を補正すれば体積後方散乱係数に比例する値 (s_v で表す) が得られるので⁷⁾、採水濾過して求めた濃度を使ってキャリブレーションを行えば、散乱強度から懸濁粒子濃度が求められる。本研究では残念ながら採水を行っていないので、懸濁粒子濃度に変換することは出来ないが、懸濁粒子濃度の定性的な変動は知ることが出来る。

図-8(a) に底層 $z = 0.2\text{m}$ での s_v の経時変化を示す。本研究の観測地点より 2 km 下流で得られている結果²⁾と同様に s_v は小潮期は小さく、大潮期に間欠的に上昇している。日潮不等のため、大きなピークは一日周期で発生している。大潮期の経時変化を拡大した図-8(b) をみると、 s_v の大きなピークは上げ潮初期の最大流速と同時に発生していることから、潮流による河床堆積物の巻き上げによるものであることがわかる。

図-9(a) に s_v の日平均値 $\bar{s}_v$ の経時変化を示す。平均潮差に対応した変動が明瞭にみられる。表-3 の回帰分析結果をみると、 $\bar{s}_v$ の変動に対して潮差の影響度が突出している。(1) 式と同様な線形回帰式で $\bar{s}_v$ 変動の大部分 (85%) が説明できている。ただし、図-10(a) に示すように、 $\bar{s}_v$ とその線形回帰推定値の関係は線形ではない。

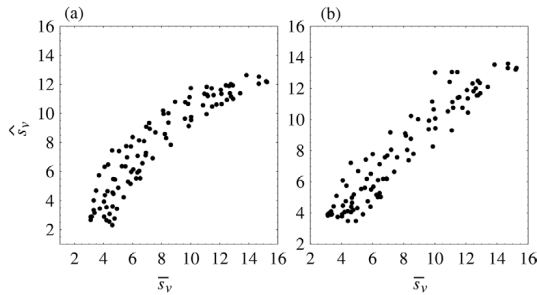


図-10 底層における体積後方散乱係数（懸濁粒子濃度）の回帰推定値と観測値の関係

$\bar{s}_v$ の変動が潮流による堆積物の巻き上げによって生じているとすれば、潮差と $\bar{s}_v$ の関係は線形ではない。近似的に流速は潮差に比例するので、底面せん断応力 τ_b は潮差の2乗に比例することになる。また、粘着性堆積物の浸食速度 E は一般に

$$E \propto (\tau_b - \tau_c)^n \quad (4)$$

のように表される⁸⁾。ここで、 τ_c は限界底面せん断応力、 n は堆積環境に依存する定数である。 $\bar{s}_v$ の回帰式として

$$\hat{s}_v = \beta_0 + \beta_1 \tilde{R}_G + \beta_2 \tilde{W} + \beta_3 \tilde{TR}^m + \beta_4 \tilde{WL} \quad (5)$$

を使用して非線形最小2乗法で求めた m は3.9であったので、 n は2程度の大きさであると推測される。表-3中に斜体で示しているように、(5)式の回帰式を使った場合の寄与率は線形回帰式の場合より大きく0.898であった。(5)式で求めた回帰推定値と観測値の関係を図-10(b)に示す。両者の関係は線形になっている。

図-9(b)は底層における懸濁粒子の移流フラックス $\overline{s_v u_b}$ の経時変化を示したものである。ただし、キャリブレーションを行っていないので、実際のフラックスとは定数倍異なっている。このため単位は付けていない。出水がなかった観測期間の結果である図-9(b)は、潮汐変動を除くと底層懸濁粒子が上流方向に運ばれていることを示している。また、輸送量は潮差とともに大きくなっていることがわかる。こうした結果は、本観測点から2km下流地点で著者らがこれまで行ってきた結果²⁾と同様であり、上げ潮初期に流速と懸濁粒子濃度が最大となるためである(図-8)。

表-3に示すように、 $\bar{s}_v$ と同様、 $\overline{s_v u_b}$ の変動には潮差が最も影響しているが、平均水深の影響の仕方は逆である。これは、平均水深が小さくなると干潮直前の下げ潮流速が底層でも大きくなり、下流方向フラックスが増加するためである。

潮差と $\overline{s_v u_b}$ の関係は非線形である。非線形最小2乗法を適用すると $\tilde{TR}^{7.36}$ となり(他の項は1次)、輸送量は潮差とともに急激に大きくなることがわかる。寄与率は0.936である。潮差の項の大きなべき

指数は、流速が潮差とともに大きくなることに加え、Tidal straining¹⁾に起因していると考えられる。

5. 結論

潮汐による水深変化が大きく、また、上流端の水門操作によって著しい非定常性を示す太田川放水路の中流部において、4ヶ月にわたる塩分分布の連続観測を出水期と平水期の2回実施し、塩水遡上の動態を解明した。また、平水期の2ヶ月間にADPによる流速分布と懸濁粒子濃度の連続測定を行い、残差流と海水の遡上速度、懸濁粒子フラックスの変動特性を明らかにした。すなわち、以下のことが判明した。

放水路の上流端にある祇園水門が全開となる出水時、塩水は完全にフラッシュされるが、水門が平常の状態に戻ると上げ潮流によって底層塩分は速やかに回復する。

大潮期は鉛直渦動粘性係数が大きくなるため塩水遡上が抑制される。また、河川流量と上流方向の風も塩水の遡上を妨げる。反対に、平均水深の増加は塩水の遡上を助長する。潮差が小さくなるほど上流方向の残差流が大きくなり、底層塩分が上昇する。

懸濁粒子の平均濃度は潮差とともに増加する。平水期の懸濁粒子の平均フラックスは上流方向で、潮差とともに急激に増加する。上流方向風は懸濁粒子の遡上を妨げる。平均水深の減少は平均濃度を増加させるが、上流方向の平均フラックスは減少させる。

謝辞: 本研究の一部は 科学研究費基盤C(課題番号: 18560499, 研究代表者: 川西 澄) および(財)河川環境管理財団 河川整備基金の補助を受けて実施したものである。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 川西 澄・筒井孝典・中村智史・西牧均: 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, 水工学論文集, 第49巻, pp. 650-654, 2005.
- 3) 川西 澄・荒木大志・福岡捷二・水野雅光: 風が太田川河口域の塩水遡上と土砂輸送に与える影響, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 781-786, 2007.
- 4) Goodrich, D. M.: On stratification and wind-induced mixing in the Chesapeake Bay, PhD thesis, Marine Sciences Research Center, State Univ of New York, Stony Brook, N.Y.
- 5) Simpson, J. H. and Hunter, J. R.: Fronts in the Irish Sea, *Nature*, Vol. 250, pp. 404-406, 1974.
- 6) 柳 哲夫: 沿岸海洋学, 153 pp., 2001.
- 7) 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.
- 8) Black, K. S., Tolhurst, T. J., Paterson, D. M. and Hagerthey, S. E.: Working with Natural Cohesive Sediments, *J. Hydr. Engrg.*, Vol. 128 (1), pp. 2-8, 2002.

(2007.9.30 受付)