

太田川分流域における流動と河床面への浸透

SURFACE WATER FLOW AND SEEPAGE INTO A RIVERBED IN A BLANCHED REGION OF THE OTA RIVER

駒井克昭¹・西村尚哉²・日比野忠史³・福岡捷二⁴・阿部徹⁵
Katsuaki KOMAI, Hisaya NISHIMURA, Tadashi HIBINO, Shoji FUKUOKA and Toru ABE

¹ 正会員 博(工) 広島大学助教 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

² 学生会員 広島大学博士課程前期 大学院工学研究科 (同上)

³ 正会員 博(工) 広島大学准教授 大学院工学研究科 (同上)

⁴ フェロー会員 工博 Ph. D 中央大学教授 研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

⁵ 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 3-20)

The water exchange through riverbeds near a branch of the Ota River estuary was investigated using a seepage meter which can measure the both of surface water infiltration and subsurface water discharge. Surface water infiltration to riverbeds was prominent in neap tide, and the water velocity in spring tide fluctuates significantly because of the density difference between surface water and subsurface water. Surface water flow and water surface gradient in the branch region were investigated, and the tidal variation of water flow distribution and material transport depend on the water surface gradient of downstream direction and transverse direction.

Key Words: Surface water, subsurface water, water surface gradient, estuary

1. 序論

河口域における干潟生態系を創出し、維持するためには、まずその場の汽水環境の特性を理解することが必要となる。汽水環境がどのような塩分濃度に保たれ、どのような変動特性を有するのかは、海水遡上、上流域からの表面流出と地下水流出を含めた淡水流入、および河口域での滞留時間等が主な物理的条件となって決まる。また、干潟に棲む底生生物にとって干潟堆積泥中の細粒分含有率や塩分は重要な因子となっており¹⁾、どのような表流水と帯水層内の作用の下で干潟の土壌環境が形成されるかを理解しなければ干潟生態系の保全は難しい。例えば、低水期における河道の流量変化は帯水層の存在と無関係ではない場合もあり²⁾、陸と海との境界における水循環は沿岸域の物質収支にとって重要なプロセスであることから³⁻⁵⁾、表流水と地下水を一貫した水循環系として捉えて河口域の水辺環境の整備を考えることが望ましい。

広島市内を流れる太田川では洪水疎通能力の確保のために放水路が構築されており、河口から約 10 km の地点において放水路と旧太田川に分岐してい

る(図-1)。旧太田川はさらに市内派川と総称される 5 河川(天満川, 本川, 元安川, 京橋川, 猿猴川)に分岐しており、海拔約 5m の祇園大橋付近から下流は太田川が作った三角州(太田川デルタ)である。太田川沿岸域における潮差は年間を通じて約 4m あり、河口から約 14km 地点まで潮汐が伝播する。この潮差とデルタ地形の緩やかな河床勾配によって河道内には干潟地形が形成されている。構築後数十年を経た放水路にも河口干潟が形成されており、河口域の整備・管理のあり方を検討する上での貴重な資料を有している。しかし、非出水期における河道の表流水とデルタ地形特有の地盤(帯水層)に蓄えられた地下水の循環の実態、ならびに潮汐の影響を強く受ける分流域の水理特性は未解明な点が多く、河口域の環境に適した流量配分と水門管理方法、および分流域の整備の考え方を検討するためにはこれらの基礎的な知見を蓄積する必要がある。

本論文では、非出水期における分流域での表流水と地下水の浸透・湧出の実態と水門周辺での流動場の潮汐変動特性を明らかにすることを目的としている。まず、分流域における河床面での浸透・湧出速度と流動場等の現地観測を行い、表流水と地下水の循環がどのようにして分流域周辺の流れの潮汐変動

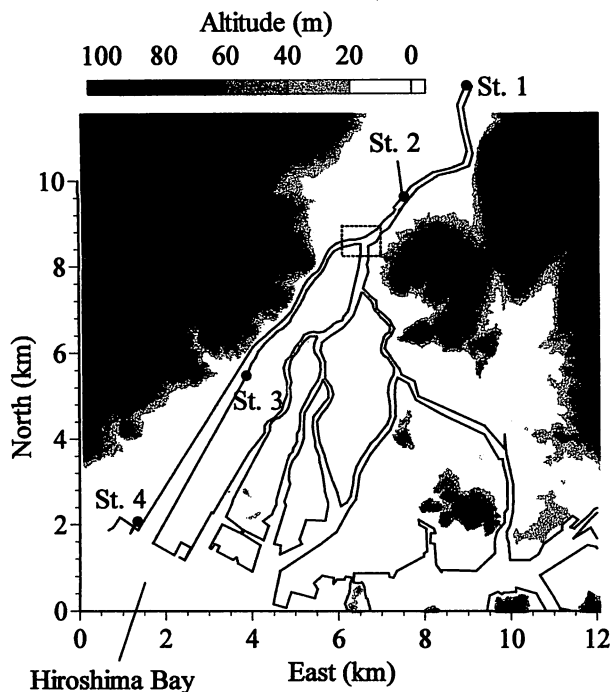


図-1 太田川感潮域における調査地点。破線枠は図-2 に拡大された範囲（分流域）。

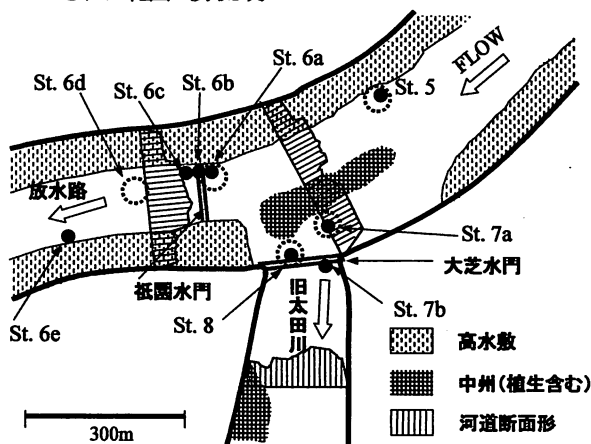


図-2 分流域における地形と調査地点。破線円は底質採取地点。

から影響を受けているのかを検討した。次に、分流域に設けられている水門を通過する流れとその周辺の流れ場の連続観測を行い、分流量や塩分環境の決定機構とその潮汐変動特性について考察した。

2. 現地観測

図-1 は太田川感潮域における調査地点 (St. 1~4) を示しており、分流域は太田川デルタの最上流部に位置している。図-2 は分流域の詳細な地形と調査地点 (St. 5~8) を示しており、祇園水門と大芝水門を通過する方向に2本の滞筋が形成され、それらに挟まれるように中州が形成されている。図-3 は St. 5~8 における表層約 5cm までの河床材料の粒度分布

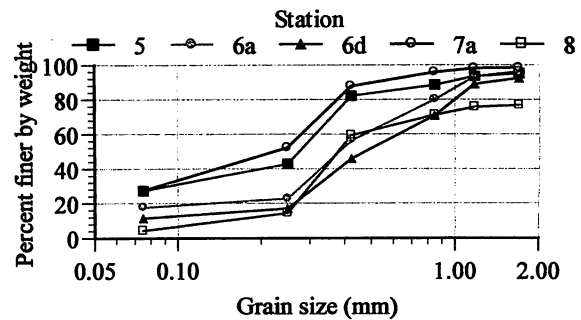


図-3 分流域周辺における河床材料の粒度分布 (2008 年 1 月)

を示している。St. 5 での底質は St. 7a に似た粒度分布特性を有しており、St. 6a に比べて細粒分の割合が多いことから、大芝水門側と祇園水門側での流速が異なることや大芝水門と上流側は他地点に比べて河床面の透水性が低いことが予想される。放水路に比べて市内派川で捕集される沈降物の細粒分含泥率が高い⁹⁾ことを踏まえると、細粒分を多く含む懸濁物が大芝水門側から遡上していることが推測される。St. 8 の底質は 2mm 以上の礫分を含む割合が多く、大芝水門と祇園水門の間の流れが細粒分を掃流していると考えられる。

(1) 河床面での浸透・湧出速度の連続測定

河川感潮域では表流水の塩分が時々刻々と変化するため、容器 (チャンバー) を河床に設置して湧出あるいは浸透する水を一定量貯留すれば、チャンバー内外の塩分の時間変化等から水の移流量を推定できる⁷⁾。基礎式は以下に示す塩分保存式である。

河床面から湧出する場合：

$$S_C^{n+1}V_C = S_C^n(V_C - Q^n\Delta t) + S_G^nQ^n\Delta t \quad (1)$$

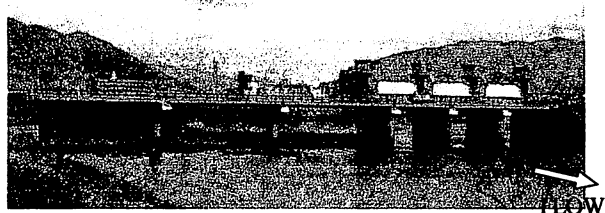
河床面に浸透する場合：

$$S_C^{n+1}V_C = S_C^n(V_C - Q^n\Delta t) + S_R^nQ^n\Delta t \quad (2)$$

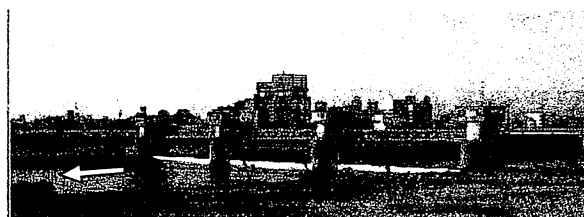
ここに、 n ：時間ステップ (=60min)、 S_C ：チャンバー内の塩分濃度、 V_C ：チャンバーの容積、 Δt ：時間刻み間隔、 S_G ：チャンバーの底面からの流入水の塩分濃度、 Q ：チャンバーへの流出入量である。なお、①チャンバー内の塩分濃度は一様であること、②チャンバー内外の流出入はチャンバー形状の影響を受けないことを仮定している。この原理を利用して河床面を通じた浸透・湧出速度を測定するため、2007 年 10 月 18 日~26 日に祇園水門上流 (St. 5) の河床面にチャンバー (直径 28cm、高さ 10cm と 5cm の 2 つ) を設置した。表流水と地下水の塩分の測定高さはそれぞれ河床面上 10cm と河床面下 10cm である。

(2) 分流域における表流水の流動場の観測

非感潮域である St. 1 では国土交通省によって水



(a)大芝水門



(b)祇園水門

図-4 大芝水門と祇園水門. FLOW は下流方向を示す.

位が観測されており、水位—流量曲線から求められた観測期間中の推定流量は $22 \sim 23 \text{ m}^3/\text{s}$ である。また、過去の記録から St. 1 から St. 2 までの区間の取水量はおおよそ $3 \sim 4 \text{ m}^3/\text{s}$ 、祇園水門より約 1.5 km 上流で合流する古川の流量はおおよそ $1 \sim 3 \text{ m}^3/\text{s}$ である。分流域ではこれらの淡水流入の影響に加えて潮汐の影響を受けるため、水位に対して流量は一意的に決まらない。図-4 は分流域に設けられている祇園水門と大芝水門の外観を示している。祇園水門は低水路に幅 33.0 m の 3 門の可動式門扉、大芝水門は幅 13.33 m の 3 門の可動式門扉と右岸側に自由越流式洪水吐を有している。非出水時には祇園水門の門扉のうち、右岸端の門扉が 0.3 m 開放され、大芝水門の門扉はすべて全開にされている。したがって、非出水時には大芝水門の門扉による流水抵抗はないが、祇園水門では 2 箇所の門扉は閉じられている上に、干潮時を除けば 0.3 m 開放されている門扉の先端が水没するため堰上げが起こることから、門扉の開度と潮位によって流れ構造が変化している。

以上の地形的な条件と水門の構造を踏まえて、分流域での水理特性とその支配要因を検討することを目的として、2007 年 11 月 27 日～28 日の M_2 潮の約 1 潮汐にかけて大芝水門と祇園水門での水位、流速、および塩分の毎時集中観測を実施した。図-5 は大芝水門と祇園水門の側面図と流速、水位、および塩分の測定位置を示している。祇園水門では開放されているゲート中央を通過する毎分平均流速 (V_{60}) を電磁流速計 (KENEK 社製) を用いて測定するとともに、ゲート開口部から遡上する海水塩分を監視するため水門直上流で塩分プロファイルの測定を行った。大芝水門の中央のゲートでは電磁流速計 (アレック電子社製) を用いて底層流速を 10 分毎に 30 秒間 (サンプリング周波数 1 Hz) の平均流速 (V_n) を測定した。なお、大芝水門の底層流速は集中観測前の約 5

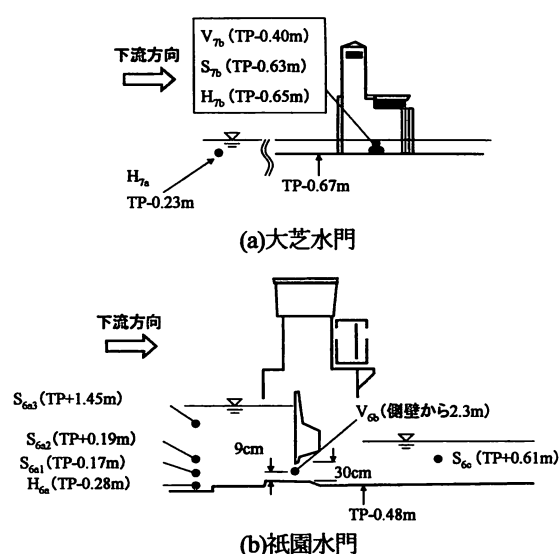


図-5 大芝水門と祇園水門の側面図と流速、水深、塩分等測定位置.

日間、祇園水門の塩分プロファイルについては集中観測前の約 1 ヶ月間のデータを取得している。さらに、図-1 に示す St. 2 と 4 において水位 (国土交通省) が観測されており、潮汐変動に伴う河道縦断方向の水面勾配の変化を検討する。

3. 河床面への浸透特性とその潮汐変動

図-6 は 2007 年 10 月 18 日～19 日および 10 月 23 日～26 日の (a) St. 1 での流量、St. 5 での表流水と地下水の塩分、(b) 地下水の湧出速度 (負の値は表流水の浸透速度)、および (c) 河川水位 (St. 1, St. 5, St. 6e) の経時変化を示している。観測期間中の降水は 10 月 26 日のみで最大 14 mm/h であった。図-7 は湧出速度のヒストグラムを小潮・大潮別に示している。

まず、図-6 左に示される小潮期の表流水の塩分変動は高高潮で約 4 psu まで上昇するときを除けば 0.5 psu 未満の変動幅に過ぎず、分流域への海水遡上はわずかである。高高潮から高低潮に向かっては湧出から浸透に転じ、その後は次の高高潮まで浸透が続く。図-7 に示すように、この期間の表流水の浸透は約 7 割の頻度を占めているが、高高潮を除けば浸透速度は 10^{-3} cm/s のオーダーしかない。

一方、図-6 右に示される大潮期には表流水と地下水の塩分変動幅は小潮期の 5～10 倍になる。しかし、湧出・浸透速度の潮汐変動は高々 3～4 倍程度である。この期間には浸透よりもむしろ湧出の方が約 20% 多い割合で起こっている (図-7)。図-6 に示すように、河床面での浸透・湧出速度は表流水と地下水の密度差が約 5 kg/m^3 を越える上げ潮から満潮付近で変動が大きいことから、河床面での浸透は潮差によ

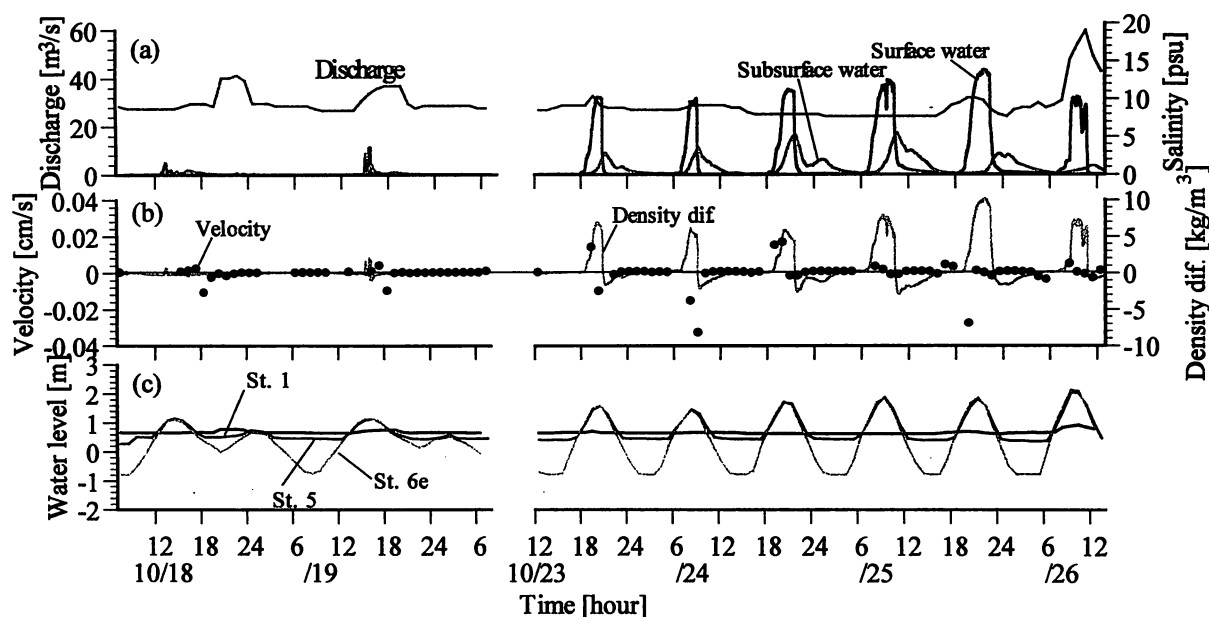


図-6 (a) St. 1 での推定流量と St. 5 での表流水と地下水塩分, (b) 河床面での湧出・浸透速度と鉛直密度差 (表流水-地下水), および (c) 河川水位の経時変化 (左図: 小潮, 2007 年 10 月 18~19 日, 右図: 大潮, 2007 年 10 月 23~26 日)

る動水勾配の増大と海水遡上に伴う密度差によって促進されと考えられる。したがって、祇園水門と大芝水門の開度調節は上流域への海水遡上とそれに伴う河床面への浸透の変化の一因となるといえる。

ちなみに、太田川放水路における淡水収支の解析結果⁸⁾によると、表流水と地下水の流出入が汽水環境の形成にとって無視できない可能性がある。このため、河川流量や平均潮位の変化に伴う河床面への浸透の変化は太田川デルタ沿岸域における広域的な地下水循環にも関係することが推測される。

4. 分流域での流動場の潮汐変動と塩分輸送

図-8 は 2007 年 11 月 27 日~28 日に観測された (a) 太田川上流, 放水路河口, 祇園水門上流, および大芝水門での水位 (H_2 , H_4 , H_{6a} , H_{7b}), (b) 遡上流速, (c) 水位差, (d) 祇園水門での上流側塩分 (河床から昇順に S_{6a1} , S_{6a2} , S_{6a3}) と下流側塩分 (S_{6c}), および (e) 大芝水門の塩分 (S_{7b}), 大芝水門と祇園水門の中間地点の塩分 (S_8), 祇園水門上流側開口部高さの塩分 (S_{6a1}), 祇園水門下流側の塩分 (S_{6c}) の経時変化を示している。ここに、各地点の水位の基準は河口 (St. 4) の高高潮の潮位に一致させている。各測定点は図-1, 2, および 5 に示されている。

(1) 分流域での潮位と水面勾配の変動特性

観測期間中の流量条件では、図-8(a)のとおりに低低潮からの水位上昇は大芝水門 (H_{7b}) と祇園水門 (H_{6a}) で 27 日 8 時すぎから起こっており、河口水位 (H_4)

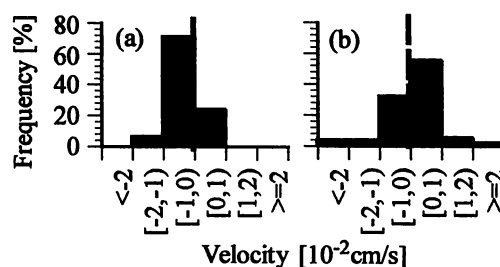


図-7 太田川分流域地点における湧出速度 (w_s) のヒストグラム ((a) 小潮, (b) 大潮)。マイナスは浸透を示す。

の低低潮 (27 日 5 時) から約 3 時間遅れている。同様に、27 日 18 時の高低潮からの水位上昇の際には河口水位からの遅れは約 1 時間である。この時間差は日潮不等によって生じており、各河川への分流量や河道断面形による潮汐伝播速度の違いの影響を受けていると考えられる。一方、高高潮 (27 日 12 時) や低高潮 (28 日 23 時) からの水位低下は河口水位からの遅れがわずかである。上流域の水位は潮汐に加えて古川からの合流や取水の影響を受けるため他地点とは異なる変動を示すことから、河道縦断方向 (上流域~旧太田川, あるいは上流域~放水路の方向) の水面勾配にも影響を及ぼしていると考えられる。

祇園水門の水位 (H_{6a}) の変動幅が大芝水門 (H_{7b}) に比べて約 40cm 大きく、干潮時に上流との水面勾配 (図-8(c)の $H_{7b}-H_2$, $H_{6a}-H_2$) が異なるのは、開口部周辺の河床地盤高の違いに加え、干潮時付近に祇園水門のゲート開口部が段落ち流れとなり水門上流側で水位が保たれるためである (図-5(b)参照)。また、下げ潮時に祇園水門と大芝水門の水位差 (図

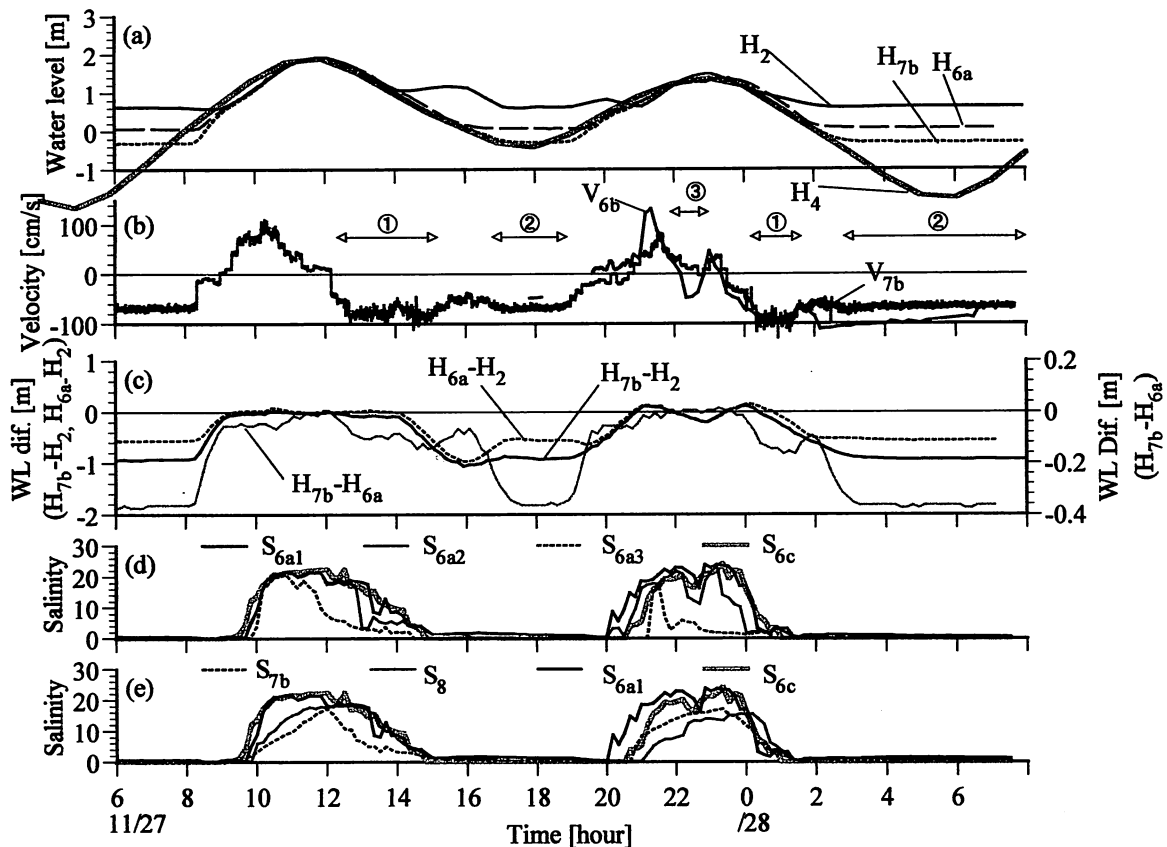


図-8 各観測点における(a)水位, (b)遡上流速 (負の値は流下速度), (c)水位差, (d)祇園水門上流と下流の塩分, および(e)大芝水門～祇園水門の塩分の経時変化 (2007年11月27～28日)。

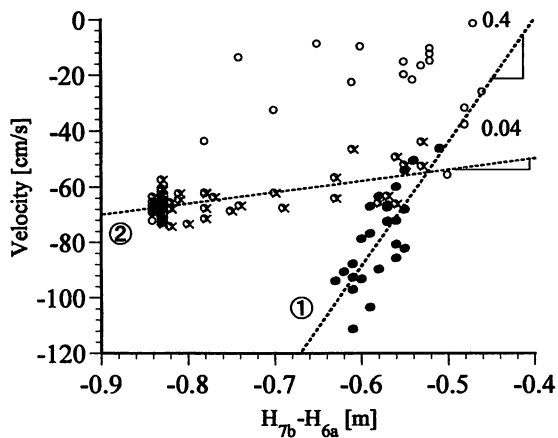


図-9 下げ潮期の大芝～祇園水門の水位差 ($H_{7b}-H_{6a}$) と大芝水門での流速 (V_{7b}) の関係。●, ×, ○はそれぞれ図-8の期間①, ②, その他の期間に対応している。

図-8(c)の $H_{7b}-H_{6a}$ が顕著になるのは、上げ潮と下げ潮で流れ構造が変化して祇園水門の流水抵抗による堰上げが起こるためと考えられる。

以上より、潮汐伝播に伴って生じる分流域における水面勾配は、河道縦断方向の水面変動特性、分流域 (水門) 周辺の地盤高、および水門開度による流水抵抗の違いによって決まると考えられる。

(2) 水門を通過する流速変動特性と分流量

大芝水門においては、流れ (V_{7b}) が上流に向かう時間帯は全観測期間 (11月24日15時～28日7時) 中の3割未満しか占めておらず、残り約7割の時間帯で流下している。図-8(b)の27日16時と28日2時頃には下げ潮で大芝水門の流速が増し (図中期間①), 下げ止まる頃に流速が弱まった後、干潮となって流速が安定した状態 (図中期間②) となる。この流速変動と図-8(c)に示す大芝～祇園水門の方向の水位差 ($H_{7b}-H_{6a}$) の変動には対応がみられる。図-9は下げ潮期の大芝～祇園水門の水位差と大芝水門での流速の関係を示しており、期間①の方が期間②より流速/水位差が大きいことがわかる。下げ潮期 (期間①) には大芝水門での流速は祇園～大芝水門方向の水面勾配が小さいが上流～下流方向の水面勾配のために流速が大きくなり、干潮 (期間②) になると河道縦断方向の水面勾配が小さくなる一方で祇園～大芝水門方向の水面勾配が流速を左右している。したがって、中州を挟む滞筋の河床勾配の違いや水門による流水抵抗が分流域固有の流速変化を生んでいることが示唆される。

また、27日22時頃には低高潮に向かう上げ潮で両水門の遡上流速が一度低下しており (図中期間③), 特に、祇園水門では流れ方向が逆転 (流下) し塩分

低下が起きている。これは、図-8(c)の St. 2 と祇園、大芝水門での河道縦断方向の水面勾配 ($H_{6a}-H_2$, $H_{7b}-H_2$) の変化に対応しており、一時的に縦断方向の水面勾配が大きくなったために遡上が弱められたものと考えられる。この現象は全観測期間中の低高潮付近のみで観測されることから、遡上流速の弱さに起因すると推測され、日潮不等の強い時期には水門周辺の塩分環境は不安定な状態にあるといえる。

以上より、祇園水門と大芝水門の通過流速に対しては両水門を横断する方向と河道縦断方向の2方向の水面勾配が支配要因となっており、上流域～分流域の地形的特性と水門の流水抵抗が生む水面勾配が水門を通過する流速の潮汐変動を複雑にしているといえる。

(3) 分流域における流量比と塩分輸送

図-10は大芝水門 (St. 6b)、祇園水門 (St. 7b)、および St. 1 での通過流量の経時変化を示している。ここでは、祇園水門と大芝水門での通過流量は実測流速×断面積、St. 1 での通過流量は水位-流量曲線から求めた。遡上と流下別に流量を分けると、観測期間中の祇園水門と大芝水門の遡上量比は 1 : 12、流下量比は 1 : 8 であり、分流域に遡上する水の大部分が大芝水門を通過したものであるが、そのうちの一部は祇園水門から流下することを示唆している。

非出水時の祇園水門の開度は 0.3m であることから、図-8(d)に示すとおり海水は開口部底層から遡上し、下げ潮時には水門上流側表層に軽い低塩分水が滞留してゲート開口部からは重い高塩分水が流出する。図-8(e)では祇園—大芝水門間の塩分 (S_8) は 27 日 10~12 時や 28 日 0~1 時にかけて大芝水門 (S_{7b}) より高塩分となる時期があり、下げ潮期に祇園水門側に遡上した水の一部が大芝水門の方向に流下している。このことは、感潮域である分流域固有の流動特性に起因して、旧太田川と放水路の間に物質輸送の経路が存在していることを示している。

5. 結論

本研究では、太田川河口域の環境に配慮した分流域での水門管理や河道整備の考え方の基本となる表流水と地下水の循環の実態解明と流れ構造の潮汐変動の把握を試みた。得られた結論を以下に示す。

- 1) 太田川分流域において河床面での浸透・湧出が生じており、潮差の増大と塩分遡上による密度差の逆転が表流水と地下水の循環の潮汐変動量を促進していることから、分流量と分流域への海水遡上を変化させる水門の開度調節は感潮域の河床地盤

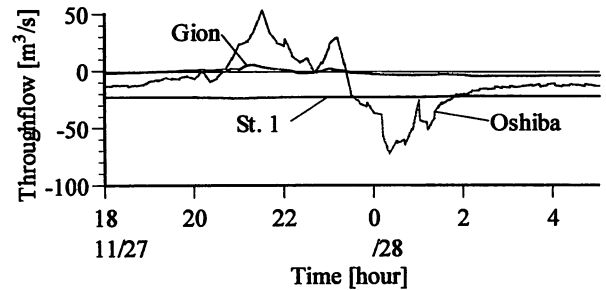


図-10 大芝水門、祇園水門、および St. 1 での通過流量の経時変化。プラスが上流向き。

内の環境にも影響を及ぼすことが考えられる。

- 2) 分流域における分流量は河道縦断方向の水面勾配や分流域 (水門) 周辺の地盤高、水門による流水抵抗等の違いが物理的要因となって決まる。感潮域である分流域固有の流動特性に起因して、分流域を通じた河川間の物質輸送が起こっていることが確認された。

参考文献

- 1) 日比野忠史, 松本英雄, 水野雅光, 福岡捷二, 保光義文: 河口干潟での棲息生物種を特定するための土壌および水質変動特性の把握, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.589-594, 2006.
- 2) Simmons, G. M. Jr. Importance of submarine groundwater discharge (SHWD) and seawater cycling to material flux across sediment/water interfaces in marine environments, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 84, pp. 173-184, 1992.
- 3) Moore, W. S.: Large groundwater inputs to coastal waters revealed by 226Ra enrichments, *Nature*, Vol. 380, pp. 612-614, 1996.
- 4) Burnett, W. C., H. Bokuniewicz, M. Huettel, W. S. Moore, and M. Taniguchi: Groundwater and pore water inputs to the coastal zone, *Biogeochemistry*, Vol. 66, pp. 3-33, 2003.
- 5) 原田守博: 河道と帯水層の結合系における相互作用の水理解析, 河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, Vol. 4, pp. 13-18, 1998.
- 6) 長戸宏樹, 越智達郎, 日比野忠史, 福岡捷二: 太田川河口域における有機泥の循環に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 51 巻, pp. 1195-1200, 2007.
- 7) 駒井克昭, 中下慎也, 日比野忠史, 福岡捷二, 水野雅光: 河川感潮域における河床面での水交換, 水工学論文集, 第 52 巻, pp. 1315-1320, 2008.
- 8) 駒井克昭, 日比野忠史, 水野雅光: 河川感潮域における淡水流入量の推定, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 976-980, 2007.

(2008. 4. 3 受付)