

太田川デルタにおける広域地下水が 干潟地下水環境に及ぼす影響

Influence of Regional Groundwater on Tidal Flat Groundwater Environment
in Ota River Delta

中下慎也¹・上野耕平²・TOUCH NARONG³・福岡捷二⁴・日比野忠史⁵
Shinya NAKASHITA, Kohei UENO, Narong TOUCH, Shoji FUKUOKA and Tadashi HIBINO

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

2学生会員 広島大学 工学研究科 社会基盤環境工学 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

3学生会員 工修 広島大学 工学研究科 JSPS特別研究員DC (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

4フェロー 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)

5正会員 博(工学) 広島大学准教授 大学院工学研究院 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

To construct and conserve a tidal flat with biodiversity, it is necessary to understand the influence of subsurface groundwater discharge on the tidal flat environment. In this study, long and short term variations of groundwater in Ota River Delta are revealed based on groundwater level and quality data measured from 2002 to 2012. Moreover, the influence of delta groundwater on groundwater quality and the effect of steel sheet pile on groundwater circulation are also discussed. It was found that various subsurface environments were formed by different groundwater conditions. Further, the groundwater conditions were strongly varied by the construction of steel sheet pile.

Key Words : Regional groundwater, groundwater level variation, tidal flat, Ota River Delta

1. はじめに

河口域に形成された沖積のデルタ地帯では地下水が広域的に伏流し、伏流した地下水が河岸や海域へ湧出している場合が多い。海域と陸域での地下水循環は重要な物質輸送過程の一つと考えられており^{1,2)}、生態系機能や地形維持等を含めて河川干潟の保全・創出を考えるには、河道内の表流水が干潟環境に及ぼす影響に加えて広域地下水すなわちデルタ地盤に蓄えられた地下水が干潟環境に及ぼす影響を理解する必要がある。例えば、潮差が4 mと大きい八代海においては海域と陸域の水位差によって海底での地下水湧出量が変化すること³⁾や、河岸の護岸に鋼矢板を打設することで地下水流動が阻害されること⁴⁾などが報告されている。本研究で対象としている広島県の太田川河口に形成された太田川デルタでは地下10～20 m付近に沖積粘土層が形成され、その上部には地下水が貯留された砂層が存在している。これまでの調査結果から、朔望周期で生じる河道内での河川水と太田川デルタ地下水の水位関係が出水期の干潟塩分の淡水化や塩分回復と関係が深いこと⁵⁾、太田川デルタ地下水が河川

の塩分状態や海域・河川への有機泥の堆積等に影響を及ぼしていることが徐々に明らかとなっており⁶⁾、広域的な地下水循環もデルタ河口干潟の生態環境を形成する重要な要因であることが予想される。さらに、太田川では河川堤防や護岸に鋼矢板の打設が進められており、地下構造の改変によりデルタ固有の地下水循環が変化していることが予想される。

本研究では、2002年から2012年まで測定されている太田川デルタ地下水の水位、水質データから短期、長期変動特性を明らかにし、太田川デルタ地下水と太田川の河岸に形成された干潟環境(地下水質)の関係や鋼矢板の打設による地下水循環の抑制について明らかにした。

2. 太田川デルタ地下水の水位・水質変動特性

(1) 太田川デルタにおける測定地点と地質構造

図-1には太田川デルタにおける地下水、河川水位の測定地点が示されている。広島市内には国土交通省中国地方整備局で管理されている4箇所の観測井(祇園: St.1, 大芝: St.2, 八丁堀1: St.3-1, 八丁堀2: St.3-2)があり、

1時間毎の地下水位等が記録されている。2007年から2009年にかけては、各観測井のストレーナと同程度の深度に塩分・水温計（JFEアドバンテック社）が設置され、10分もしくは30分毎に地下水質の連続測定が併せて行われた。また、河川水位は国土交通省中国地方整備局によって1時間毎に測定されている3地点（草津、祇園、矢口第一）の水位データを使用した。河川流量は、矢口第一（非感潮域）で測定された河川水位からH-Q式を用いて算出されている。図-2には図-1に示すA-A'断面における地質構造と各調査地点における水質測定深度が示されている。太田川デルタにおいては、地表下10~20 mに透水性の低い粘土・シルト層が形成されており、東西方向においても同様の傾向があること⁷⁾から、St.1, St.3-2は不圧帯水層の地下水、St.2, St.3-1は被圧帯水層の地下水を測定している。また、本論文中的高さ、水位は全てT.P. (Tokyo Peil, 東京湾平均海面) を基準としてまとめている。

(2) デルタ地下水位の長期変動

図-3には2002年から2012年までの(a)不圧帯水層（St.1, St.3-2）の地下水位、(b)降水量（広島観測所）、(c)被圧帯水層（St.2, St.3-1）の地下水位、(d)河川流量（矢口第一の河川水位から算出）の経時変化が示されている。なお、地下水位は25時間の移動平均値が示されている。

長期データより、不圧地下水位、被圧地下水位とも夏期に上昇し、冬期に低下する較差50 cm程度の年変動があること、被圧地下水位には較差10 cm程度の朔望変動があること、2002年から被圧地下水位が上昇傾向にある

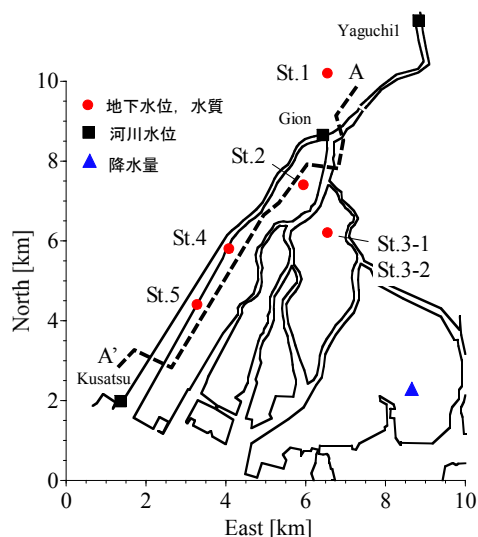


図-1 太田川デルタにおける調査地点

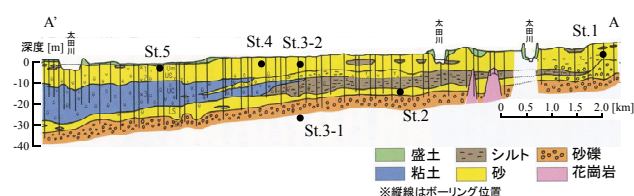


図-2 A-A' 断面における地質構造と地下水調査深さ
(太田川史⁷⁾を加筆修正)

ことがわかる。太田川デルタの被圧地下水位は海水位の年変動と非感潮域の河川水位（矢口第一）に依存して変動していることが報告されているため³⁾、海水位の年変動成分を取り除いて地下水位の上昇勾配を検討すると、

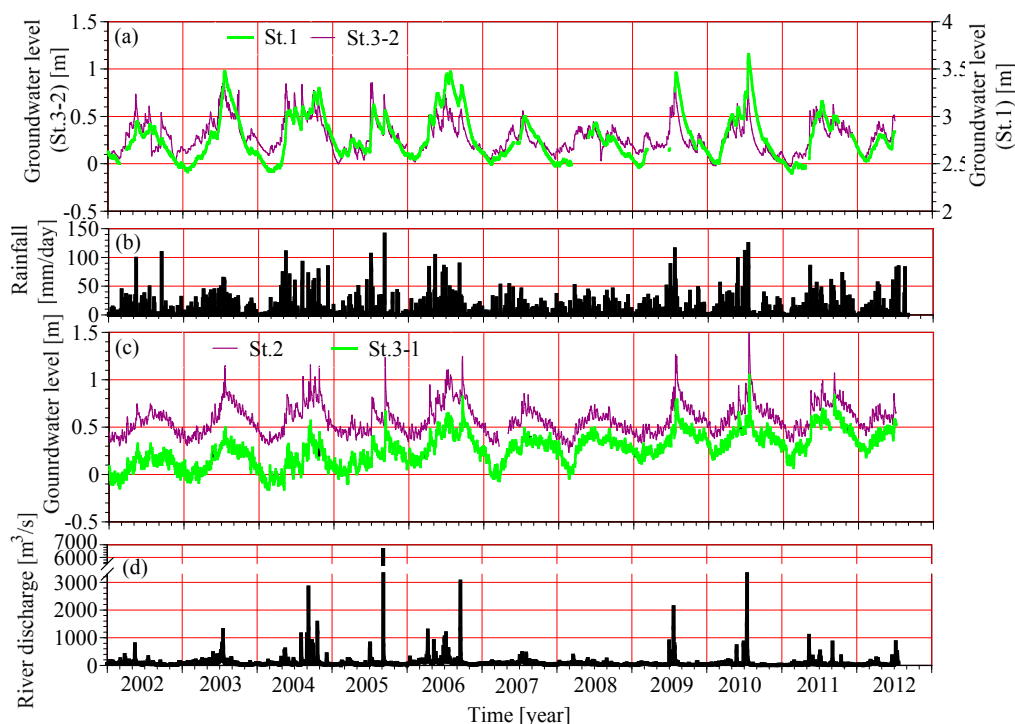


図-3 2002年から2012年までの (a) 不圧帯水層 (St. 1, St. 3-2) の地下水位, (b) 降水量 (広島観測所), (c) 被圧帯水層 (St. 2, St. 3-1) の地下水位, (d) 河川流量 (矢口第一の河川水位から算出) の経時変化 (地下水位は25時間の移動平均値)

St.2では0.5 cm/year, St.3-1では3.3 cm/yearの上昇勾配となっていることがわかった。なお、不圧地下水については地下水位の経年的な上昇傾向は確認されなかった。被圧地下水位の上昇の原因には被圧帯水層の構造の変化、もしくは地下水が流出する河口域海底の透水能力の低下などが考えられる。

一般的に不圧地下水位の変動は降水量に依存しているといわれているが、太田川デルタにおいても、降水量のピーク時に不圧地下水位の上昇が確認できる。一方、被圧地下水位は降水量よりも河川流量（矢口第一の河川水位）に似た変動傾向を有しており、河川水位の上昇のピークに合わせて地下水位のピークが生じていることがわかる。例えば、2005年9月の太田川における既往最大出水（7000 m³/s）においては、被圧地下水が河川水位の上昇に応じたピークを有しているのに対し、不圧地下水は9月の出水よりも7月に生じた1000 m³/s以下の出水で地下水位が高くなっており、出水以前の梅雨期の降雨の履歴によって地下水位が上昇した影響が強く現れている。

(3) 出水に対するデルタ地下水の応答

図-4には2010年7月の出水における(a)河川水位（草津）、河川流量、(b)不圧地下水位、降水量、(c)被圧地下水位の経時変化が示されている。

太田川デルタ地下水位の日変動特性として、不圧地下水には潮汐の日変動が現れていないのに対し、被圧地下水には、St.2、St.3-1ともに潮汐の1/10程度の水位変動が現れている。被圧帯水層ではSt.1付近や沿岸部にある被圧帯水層の境界部から河川や海域の潮汐振幅が減衰しながら伝わっていること、不圧帯水層では潮汐振幅が伝播する過程で大きく減衰しているため、日変動成分が現れていないことが予想される。

デルタ地下水位の出水に対する応答は、不圧地下水、被圧地下水で大きく異なる。デルタ地帯の不圧地下水であるSt.3-2においては降水が確認されるとすぐに地下水位の上昇が始まり、降水のピークに応じて地下水位のピークが生じている。降水後の地下水位は速やかに低下し、10日程度で出水前の地下水位と同程度まで低下している。さらに、陸域に近い不圧地下水であるSt.1において地下水位は徐々に増加し、地下水位のピークは河川水位のピークから遅れて生じている。上昇した地下水位は徐々に低下し、30日程度で出水前の地下水位と同程度まで低下している。陸域の不圧地下水位は、周辺流域における降水の影響が強く現れるため、地下水位の変化が緩やかであることが考えられる。

一方、被圧地下水位は前節でも示したように降水よりも降水に伴う河川水位（河川流量）の上昇に応じた変動を示しており、地下水位の低下は河川水位の低下に伴って生じている。なお、被圧、不圧地下水の水温、塩分は、全地点において日変動成分、出水に対する応答は確認されなかった。

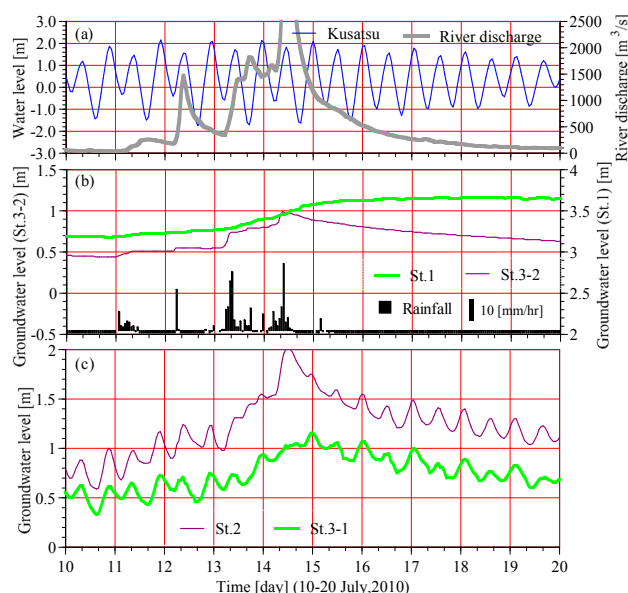


図-4 2010年7月の出水における(a)河川水位（草津）、河川流量、(b)不圧地下水位、降水量、(c)被圧地下水位の経時変化

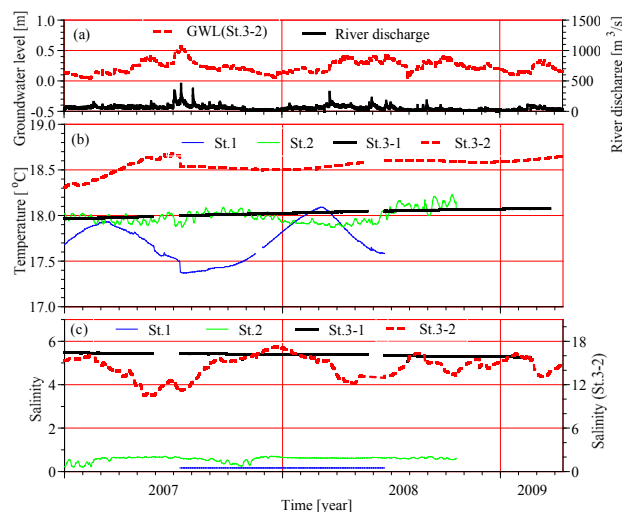


図-5 2007年から2009年までの(a)河川流量、St.3-2における地下水位、太田川デルタの各調査地点で測定された(b)地下水温、(c)地下水塩分の経時変化

(4) デルタ地下水質の長期変動

図-5には2007年から2009年までの(a)河川流量、St.3-2における地下水位、太田川デルタの各調査地点で測定された(b)地下水温、(c)地下水塩分の経時変化が示されている。

地下水温はデルタ全域で約18°C±0.5°C程度に保たれていること、St.1は季節的に0.5°C程度の年変動があること、St.2は0.1°C程度の朔望変動があること、St.3-1、St.3-2では水温の季節的な変化が無いことがわかる。地下水塩分はSt.1、St.2では1以下の淡水、St.3-1では年間を通じて5.5で一定の塩水、St.3-2では約15で3程度の変動を含んだ塩水となっていることがわかる。塩分は上流に向かう

につれて低下しており、St.3においては不圧帯水層と被圧帯水層でそれぞれ塩分が異なる。St.3-2の地下水塩分は地下水位の上昇に伴い1程度低下していることから、降水によって地下水位が増加、塩分が低下していることがわかる。これらのことから、太田川デルタ地下水の水温、塩分の日周期、年周期変動、出水に対する応答は小さく、一年を通じて安定な状態にあることが明らかとなった。

3. デルタ地下水と河岸干潟における水循環

2章では、デルタ地下水の水位や水質の長期、短期変動特性について明らかにした。太田川デルタにおいては、河道への矢板の打設が進められており、河川とデルタ地下間の水循環が阻害されていることが予想される。本章では、矢板の打設状況（深さ）の異なる地点において不圧帯水層のデルタ地下水位と河川水位の水位差を考慮して河岸干潟の地盤内の水環境の変動について検討を行った。

(1) 複断面河道における地下水の水循環

a) 調査地点の概要

太田川放水路の河口から約5.5 km上流地点（St.4）において2006年から2010年にかけて地下水質、河川水質の連続測定を行った。調査地点の横断面図と機器設置位置を図-6に示す。調査地点においては、石積護岸が概ね平均潮位高に構築されているため、満潮時に海水が浸入し汽水性の潮だまり（タイドプール）が形成されている。

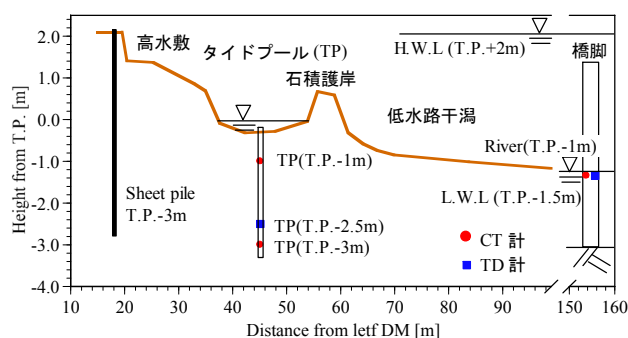


図-6 St. 4における横断面図と機器設置位置

タイドプールには観測井（全層ストレーナの塩ビ管）が埋設されており、塩分・水温計（CT計、JFEアドバンテック社）、水温・水位計（TD計、JFEアドバンテック社）を用いて地下水塩分、水温、地下水位の連続測定が行われた。また、調査地点には平成8年に行われた堤防強化工事において図-6に示すような不透水性の鋼矢板がT.P.-3mまで打設されているが、矢板は不透水層（T.P.-10m程度）まで達しておらず、これまでの調査結果からもデルタ地下水との水循環が存在していることが予想されている⁹⁾。

b) 地下水塩分の長期変動

図-7には2006年から2010年までの(a)デルタ地下水位（St.2）、河川流量、St.4における地下水と河川水の(b)塩分、(c)水温の経時変化が示されている。なお、塩分、水温データは25時間の移動平均値が示されている。

タイドプールのT.P.-1mの塩分変動はほぼ河川水の塩分変動に対応していること、T.P.-1mとT.P.-3mで出水期において変動が大きく異なることがわかる。特に、2006

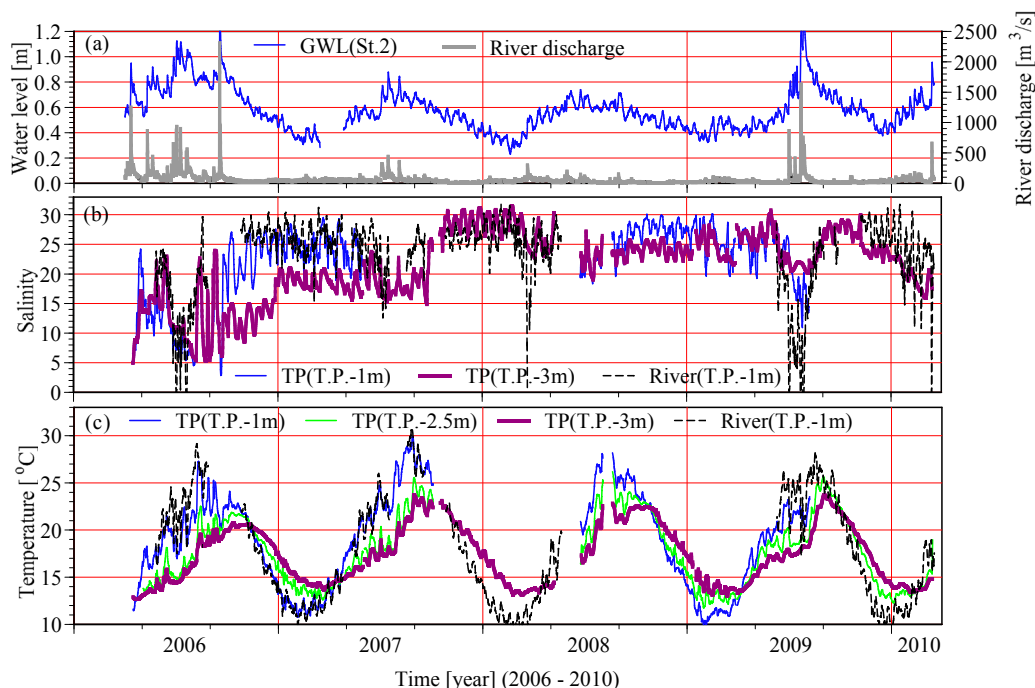


図-7 2006年から2010年までの(a) デルタ地下水位（St. 2）、河川流量、St. 4における地下水と河川水の(b) 塩分、(c) 水温の経時変化（塩分、水温データは25時間の移動平均値）

年の出水ではT.P.-1mとT.P.-3mの間で10以上の塩分差が生じており、河川塩分が高くなった時期においてもT.P.-3mで低塩分が維持されている。これは、出水によりデルタ地下水の水位が出水後も数ヶ月間高く維持され（図-7(a)）、低塩分のデルタ地下水（図-5(c)）が河岸干潟へ流出することで低塩分が維持されていると考えられる。

c) 地下水水温の長期変動

水温変動は塩分変動よりも顕著にデルタ地下水の流出の傾向が現れている。塩分と同様にT.P.-1mの変動は河川水温と同様の変動を有しているが、T.P.-2.5m、T.P.-3mの水温は夏期に低く、冬期に高い。これは、デルタ地下水水温はほぼ18℃で安定しているため（図-5(b)）、デルタ地下水の流出により夏期に水温が低く、冬期に高く維持されていると考えられる。さらに、この傾向はT.P.-2.5mの水温よりもT.P.-3mの水温で顕著であり、年間を通じて継続していることから、地盤下数mにおいてデルタ地下から河川方向へ向かう地下水流が恒常的に生じていることが予想される。

(2) 矢板の有無が地下水水質変動に与える影響

a) 調査地点の概要

太田川放水路の河口から約4 km上流地点（St.5）において209年から2010年にかけて地下水質、河川水質の連続測定を行った。調査地点の横断面図と機器設置位置を

図-8に示す。本調査地点においては、矢板が打設されている干潟の100 m下流に矢板が打設されていない干潟が存在しており、両地点に埋設された観測井に図-8に示す深さでCT計、TD計を設置し、矢板の有無による地下水質の変化について検討した。矢板は長さ13 mの不透水性のものであり、不透水層まで達しているが、施工範囲は縦断方向に150 m程度である。図中には実線で大潮満潮時と干潮時の河川水位、太線で大潮干潮時の各観測井で測定された地下水位、点線で予想される地下水面が示されている。地下水面を比較すると矢板有りの干潟では矢板の前後で地下水面に1 m以上の差があることから、矢板の打設により横断方向の地下水循環が阻害されていることがわかる。

b) 矢板有り干潟の地下水水質変動

図-9には2009年から2010年にSt.5の(a)矢板有り干潟、(b)矢板無し干潟で測定された河川流量、デルタ地下水位（St.3-2）、地下水、河川水の塩分、水温の経時変化が示されている。なお、塩分、水温データは25時間の移動平均値である。矢板有り干潟地盤内の塩分・水温変動は、河川水の変動と大きく異なっていることがわかる。塩分は河川水よりも5程度低い状態で年間を通じて維持されており、出水時においてもT.P.-4mでは塩分の低下は生じていない。水温は河川水と比較してT.P.-4mで夏期に低く、冬期に高い傾向にあること、表層に近づくにつれ

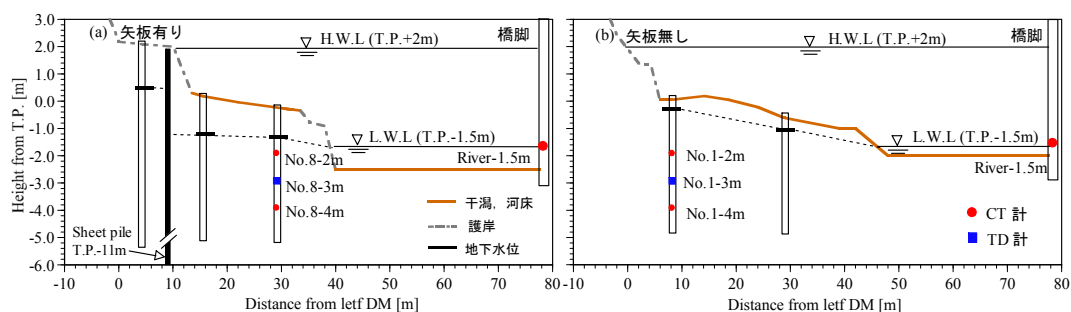
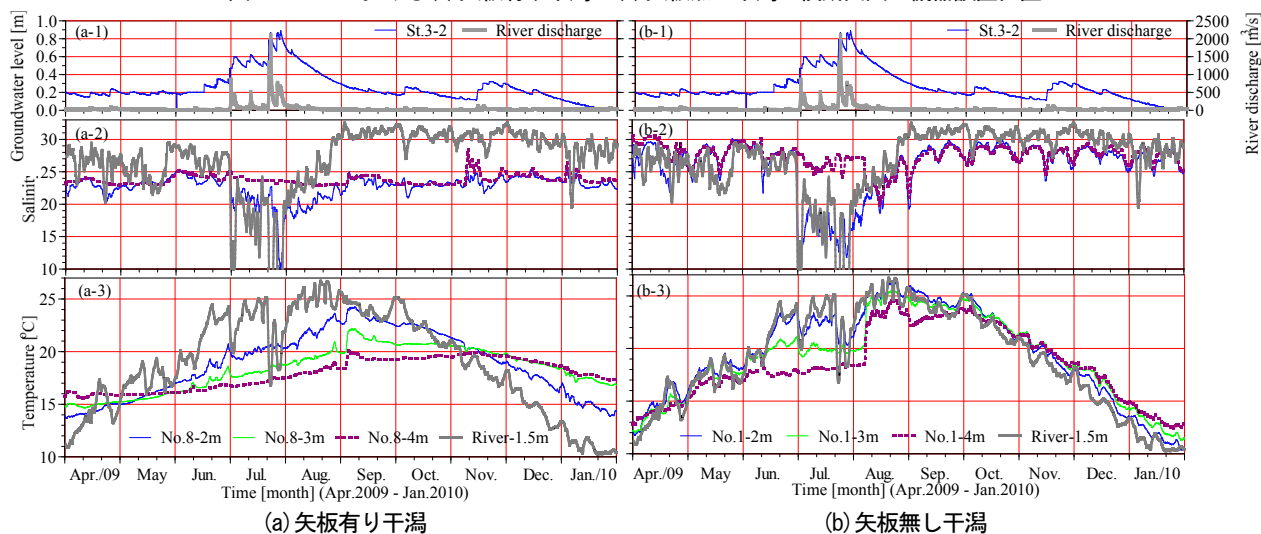


図-8 St. 5における (a) 矢板有り干潟と (b) 矢板無し干潟の横断面図と機器設置位置



(a) 矢板有り干潟

(b) 矢板無し干潟

図-9 2009年から2010年にSt. 5の (a) 矢板有り干潟、(b) 矢板無し干潟で測定された河川流量、デルタ地下水位（St. 3-2）、地下水、河川水の塩分、水温の経時変化（塩分、水温データは25時間の移動平均値）

て河川水の水温変動に近づいていることから、St.4におけるタイドプールのT.P.-3mの水温変化と同様の変化をしていることがわかる。矢板有り干潟においては、不透水層まで達する矢板が打設されているが、施工範囲が150 mと局所的であるため、矢板未施工の地点からデルタ地下水の流出の影響を受けてこのような変動をしていることが考えられる。表層付近では地下水流動が抑制され、河川水位変動に応じた地下水位変動となったことで、河川水が直接浸透する範囲（T.P.-1m付近）において干潟地盤内に有機泥が堆積し、透水性が低下していることがわかっている⁸⁾。そのため、河川水の表層からの浸透の影響は小さい。

c) 矢板無し干潟の地下水質変動

矢板無し干潟地盤内の塩分・水温変動は、河川水に似た変動を有していること、塩分は年間を通じて矢板有り干潟よりも5程度高く維持されていることがわかる。深さ方向には水温・塩分ともT.P.-2mからT.P.-4mまで大きな変化が無いことから、河川水位が不圧帯水層のデルタ地下水位（例えばSt.3-2）よりも高くなる満潮時にT.P.-4mまで河川水が浸透していることがわかる。2009年6月から7月にかけて生じた出水においては、河川流量が増加する前からT.P.-4mにおける地下水温が低下し始めている。これは、同時期に不圧デルタ地下水位（St.3-2）が上昇していることから、降水によるデルタ地下水位の上昇によって水温の低いデルタ地下水（No.8-4mの水温と同程度）が河道方向へ流出したことが予想される。

これらのことから、干潟地盤内の水質変動は河川水位と不圧帯水層のデルタ地下水位との水位差によって生じる地下水流れの影響を強く受けていること、矢板の打設による地下構造の改変により干潟地盤内の環境が大きく変化することが明らかとなった。

4. おわりに

本研究においては、太田川デルタ地下水の長期連続データから不圧地下水、被圧地下水の変動特性を明らかにし、太田川デルタ地下水が太田川の河岸に形成された干潟地盤内の水環境に及ぼす影響について検討を行った。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 太田川デルタにおける不圧地下水位、不圧地下水位は較差50 cm程度の年変動を有しており、被圧地下水位は経年的に上昇傾向にある。
- (2) 太田川デルタにおける不圧地下水位は降水の影響を受けた変動をしており、被圧地下水位は被圧帯水層の境界部の潮汐変動の影響を受けた変動をしている。
- (3) 太田川デルタ地下水の水温、塩分の日周期、年周期変動、出水に対する応答は小さく、一年を通じて安定な状態にある。
- (4) 太田川放水路における干潟地盤内の水質変動は河川水位と不圧帯水層のデルタ地下水位との水位差によって生じる地下水流れの影響を強く受けている。さらに、矢板の打設による地下構造の改変により干潟地盤内に形成される水環境が大きく異なる。

参考文献

- 1) Moore, W. S. : Large groundwater inputs to coastal waters revealed by 226Ra enrichments, *Nature*, Vol. 380, pp. 612-614, 1996.
- 2) Alley, W. M., Healy, R. W., LaBaugh, J.W., Reilly, T.E. : Flow and Storage in Groundwater Systems, *Science*, Vol.294, pp.1985-1990, 2002.
- 3) 石飛智稔, 谷口真人, 嶋田純 : 沿岸海底湧出量測定による塩淡水境界変動と地下水流出の評価, 地下水学会誌, 第49巻第3号, pp.191-204, 2007.
- 4) 島谷幸宏, 中村圭吾, 渡辺昭彦ら : 生態系に配慮した鋼矢板河川改修工法-一透水性鋼矢板の導入-, 地下水技術, 第38巻第4号, pp.1-8, 1996.
- 5) 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.
- 6) 日比野忠史, 松本英雄, 水野雅光 : 太田川デルタ地下水の流動と海底濁度層の形成, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1146-1150, 2006.
- 7) 建設省中国地方建設局 太田川工事事務所 : 太田川史, p.74, 1993.
- 8) 中下慎也, 駒井克昭, 日比野忠史, 福岡捷二, 阿部徹 : 地下構造が河川干潟の地下水・底質環境に及ぼす影響, 河川技術論文集, 第16巻, pp.185-190, 2010.6.

(2012. 9. 30受付)