

地下構造が河川干潟の 地下水・底質環境に及ぼす影響

INFLUENCE OF UNDERGROUND STRUCTURE ON THE GROUND WATER
AND SEDIMENT ENVIRONMENT IN AN ESTUARINE TIDAL FLAT

中下慎也¹・駒井克昭²・日比野忠史³・福岡捷二⁴・阿部徹⁵

Shinya NAKASHITA, Katsuaki KOMAI, Tadashi HIBINO, Shoji FUKUOKA and Toru ABE

¹ 学生会員 広島大学博士課程後期 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

² 正会員 博(工) 広島大学助教 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 measurement of groundwater quality, sediment and biological survey have been performed in order to clarify the influence of sheet pile on groundwater, sediment and biological environment in an estuarine tidal flat. Observation results suggested that groundwater exchange (from surface to 4 m) was occurred by the difference between river water level and groundwater level of Ota river delta in the tidal flat where sheet pile was not inserted. On the contrary, the groundwater level decreased more than 1 m in the tidal flat where the sheet pile was inserted; this means that groundwater exchange between Ota river delta and river hardly occurs in the tidal flat. Moreover, the different of sediment and biological environment were appeared in relation to the difference of groundwater environment.

Key Words: Groundwater exchange, sheet pile, groundwater quality, estuarine tidal flat

1. 序論

河川堤防には洗掘による護岸の破壊, 堤防基盤内の地下水浸透による破堤, 大地震時の液状化による堤防の沈下を防ぐために矢板工を構築するが多い. 兵庫県南部地震以後は地震外力の見直し, 耐震性能の照査方法の規定がなされ, 堤防の耐震性の強化がすすめられている. 一方, 河川環境の面からみると, 矢板周辺で形成される流れ場や塩分分布に関する議論はなされている¹⁾が, 地下水循環を考慮した干潟環境へのインパクトは明らかになっていない. 本研究で対象としている太田川デルタは太田川による河口への砂礫の堆積により形成されており, 地下構造の改変がデルタ固有の地下水循環状況に影響を及ぼすことが予想される.

太田川放水路の河川干潟を対象としたこれまでの研究では, 地下水流れに伴って干潟地盤内へ有機物が輸送されていること²⁾, 地下水循環によって地下水位が高く維持されること, 二枚貝の棲息にとって地下水位が重要であること³⁾などが明らかになっている. また, 太田川デルタと河川干潟の地下水循環の機構が明らか

になりつつあり⁴⁾, 太田川デルタ地下水が河川の塩分状態に影響を及ぼしていること⁵⁾などがわかっている.

現在, 太田川放水路では災害時に使用する緊急用河川敷道路(以下, 緊急道路と称する)の拡張が進められており, 干潟環境の保全に配慮した河道断面が計画され, 2010年4月から実証実験が行われている. 干潟環境の保全に効果的な河道断面を検討するために, 矢板が打設されている既設の緊急道路の前面に形成された干潟と矢板未構築の河道内に形成された干潟を対象として2009年に事前調査が行われた. 本論文では, 調査結果を用いて太田川放水路における矢板の有無が干潟環境(地下水質, 底質, 生物棲息数など)に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている.

2. 現地観測の概要

(1) 観測地点の概要

太田川放水路は建設後約40年を経ており, 現在では放水路全域に安定した干潟が形成されている. 太田川河口から4km上流の旭周辺では実証実験場所として干潟造成前の既存の干潟(以下, 実験区と称する)で2009

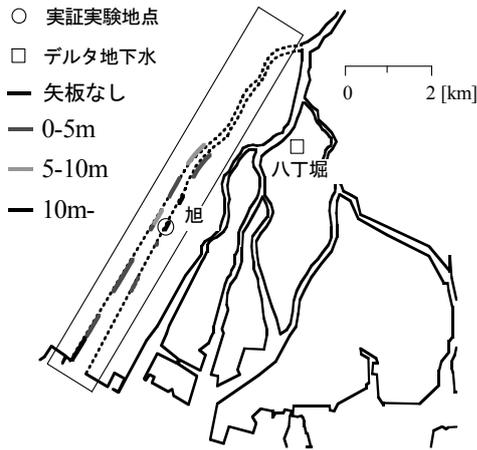


図-1 太田川感潮域における調査地点と太田川放水路に打設された矢板深さ

年3月からモニタリングが開始された。同時に、実験区より100m上流側の既設緊急道路の前面に形成された干潟（以下、対照区と称する）でモニタリングが開始された。図-1には太田川感潮域における調査地点と太田川放水路の堤防法尻に打設されている矢板深さ、図-2には(a)実験区と(b)対照区の横断形状と機器設置位置が示されている。各断面内には地下水質の観測井（No.1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10）が埋設されており、No.10はNo.6より30m上流の緊急道路上に位置している。また、図中には実線で2009年5月26日の大潮最干時の水面位置と点線で線形補間された地下水面が示されており、図-2(b)では太線で矢板深さが示されている。対照区には平成10年から11年にかけて行われた堤防強化工事において長さ13mの不水性の広幅鋼矢板（IVw型）がT.P.-11mまで打設されている。

表-1には観測井の諸元、図-3には観測井のストレーナの構造が示されている。観測井は図-3に示すストレーナを有する塩ビパイプに、砂粒の浸入を防ぐために2mmメッシュのプラスチック製の網を全層に巻いたものが地中に打設されている。なお、井戸底部は閉じられている。

(2) ボーリング調査による地下構造の把握

2009年2月に観測井の埋設に合わせてボーリング調査が行われた。No.10においては、ロータリー式ボーリングで掘削した土砂を地盤材料の変化が確認された箇所前後で採取し、その他の地点においては、上総堀りで掘削した土砂を0.5mまたは1m毎に採取した後、粒度分布が測定された。なお、ボーリング時にはコア採取と同時に標準貫入試験が実施された。

(3) 地下水質と河川水質の連続測定

各観測井には図-2に示す深さに塩分・水温計（Compact CT, JFEアドバンテック社製）、水温・水位計（Compact TD, JFEアドバンテック社製）が設置され、水温、塩分、地下水位が10分毎に連続測定された。各観測井には、大潮干潮時の地下水面下30cm程度の位

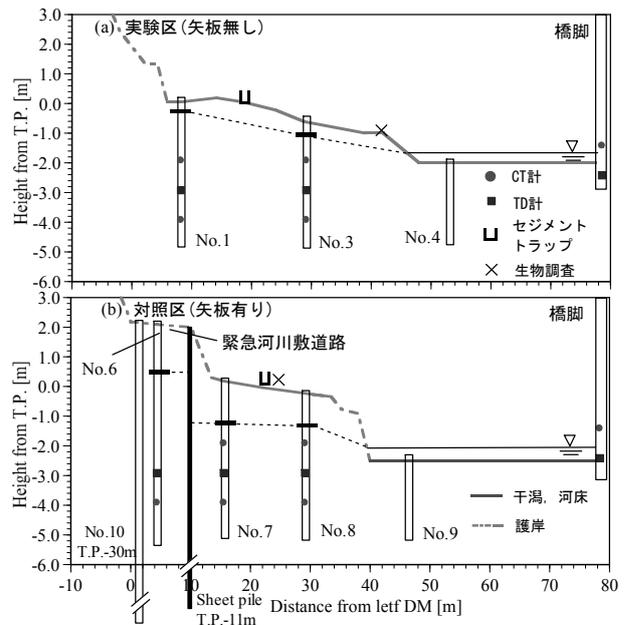


図-2 (a)実験区と(b)対照区の横断形状と機器設置位置
（図中には実線で2009年5月26日の大潮最干時の水面位置と点線で線形補間された地下水面が示されている）

表-1 観測井の諸元

No	井戸深さ [m]	ストレーナ位置 [m]
No.1	5.0	全層
No.3	5.0	全層
No.4	3.0	全層
No.6	7.5	全層
No.7	5.5	全層
No.8	5.5	全層
No.9	3.0	全層
No.10	32.0	29.3-31.3

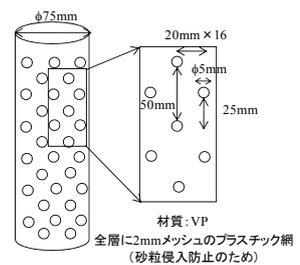


図-3 観測井の構造（模式図）

置にパッカー（ナイスシールD型、応用計測サービス株式会社）が設置されているため、井戸上部から直接河川水が浸透することはない。

また、2009年1月から5月の間に広島市内の八丁堀（図-1）にて国土交通省で管理されている観測井の深度10m（T.P.-8m）に塩分・水位計が設置され、太田川デルタ地下水の水温、塩分が30分毎に連続測定された。同時に国土交通省により1時間毎の地下水位が測定されている。ストレーナ位置は地盤下4~13mの砂層にあり、測定されている地下水位は不圧地下水である⁴⁾。

(4) 底質・有機泥捕捉調査

干潟に堆積する有機泥の性状を検討するため、内径10cmの塩ビパイプ（セジメントトラップ）を開口部高さが干潟面から30cmになるように設置して沈降物（有機泥）が捕捉された。セジメントトラップに捕捉された有機泥は浮遊物質（SS）、粒度分布、有機物量（IL）が測定された。調査は2009年3月~12月の間に30日を基準として行われ、同時に干潟堆積泥が採取された。干潟堆積泥は干潟表層5cmで採取されたものであり、

粒度分布, IL が測定された。

(5) 生物調査

実験区と対照区の干潟に棲息する生物種、個体数を比較するために、2010年3月に生物調査が実施された。調査では実験区、対照区の両地点において干潟に棲息する代表的な二枚貝であるアサリ、オキシジミ、ソトオリガイ、ホトトギスガイを対象とした。調査は、30cm×30cm のコドラート内の干潟表面から深さ 15cm までに出現した二枚貝の種類と個体数を測定した。

3. 矢板背面の地下水質特性の検討

(1) 矢板背面の地下構造と地下水循環

図-4にはボーリング調査で得られた No.10 の地盤材料の(a)N 値, (b)土質分類の鉛直分布が示されている。地下構造は, T.P.-10m 程度までは主に砂で構成される不圧帯水層, T.P.-25m までは主に粘土で構成される不透水層, T.P.-25m 以深は砂や砂礫で構成される被圧帯水層となっていることがわかる。また, 図-2(b)に示されている大潮最干時に測定された地下水位は, No.6 (矢板背面) で T.P.+0.3m, No.7 (矢板前面) で T.P.-1.2m であり, 矢板の前後で地下水が分断されていることがわかる。これらのことから, 13m の矢板が打設されている対照区では, 矢板が不透水層まで達しており, 断面内での堤内地側 (陸域, デルタ地下水) と堤外地側 (河川水, 干潟地下水) の地下水循環が制限されていることが予想される。

(2) 矢板背面の地下水と太田川デルタ地下水の関係

図-5には2009年4月25日と2010年3月31日に No.6 で測定された地下水の(a)塩分, (b)水温, (c)DO の鉛直プロファイル, 図-6には2009年1月から8月に八丁堀 (太田川デルタ), No.6 (矢板背面) で測定された地下水の(a)水位, (b)塩分, (c)水温変動が示されている。図-6(a)には矢口第一 (太田川河口から 15km 上流, 非感潮域) で測定された河川水位から換算した河川流量, 図-6(b), (c)には点線で図-5に示す鉛直プロファイルの測定日が示されている。

八丁堀で測定されたデルタ地下水の平均水位は約 T.P.+0.2m, 平均塩分は 15, 平均水温は 18.5°C でそれぞれ日変動が無いこと, 出水 (降水) に伴って地下水位が大きく変動していることがわかる (図-6)。一方, No.6 の地下水の平均水位は約 T.P.+0.35m で日変動が 0.1m 程度であり, デルタ地下水より約 0.15m 水位が高く, 同様の水位変動を有していること (図-6), 水面下 3m までは淡水, 4m 以深では塩分 23, 水温 17.5°C, DO がほぼ 0 の塩水となっていること (図-5), 水質の日変動が小さいこと (図-6) がわかる。

図-6に示す No.6 の T.P.-2m と T.P.-3m の水質変動は, 図-5と比較するとそれぞれ淡水層, 淡水層と塩水層の遷移域を測定しているため, 塩分・水温はデルタ地下

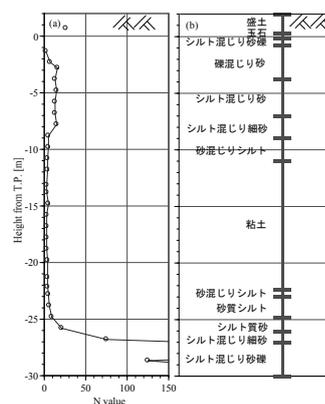


図-4 ボーリング調査で得られた No.10 の地盤材料の(a)N 値, (b)地下構造の鉛直分布

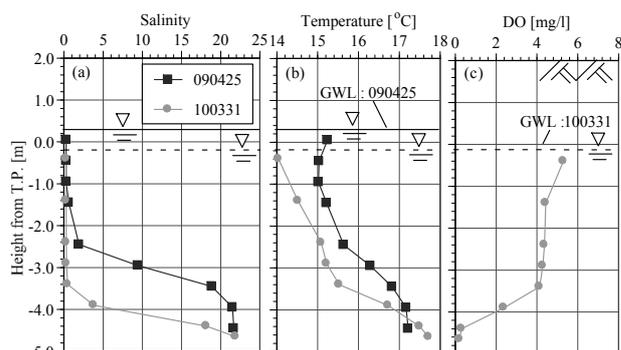


図-5 No.6 で測定された地下水の(a)塩分, (b)水温, (c)DO の鉛直プロファイル (図中には実線と点線で各観測日の地下水位が示されている)

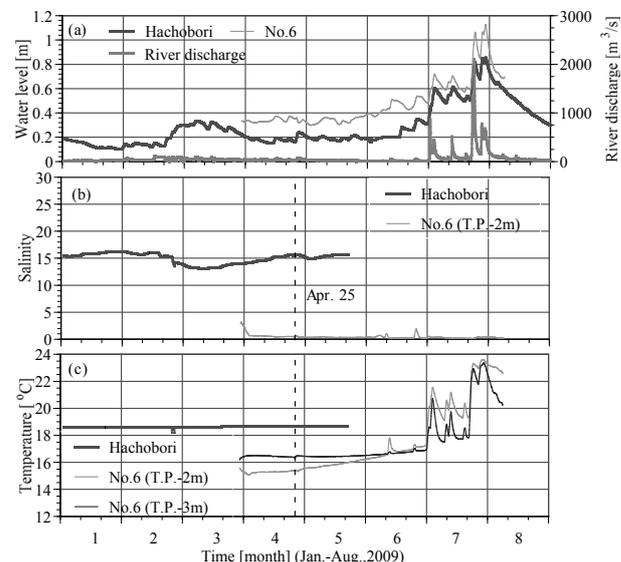


図-6 2009年1月から8月に八丁堀, No.6 で測定された地下水の(a)水位, (b)塩分, (c)水温変動の時系列変化 (図中には点線で鉛直プロファイルの測定日が示されている)

水と比べて大きく異なるが, 図-5に示す水面下 4m 以深の塩分・水温はデルタ地下水質に近い。No.6 は八丁堀よりも河道に近いため 2009年4月, 2010年3月に測定された水面下 4m 以深の地下水塩分はデルタ地下水より 8 程度高く, 水温は約 10°C ある河川水の年変動

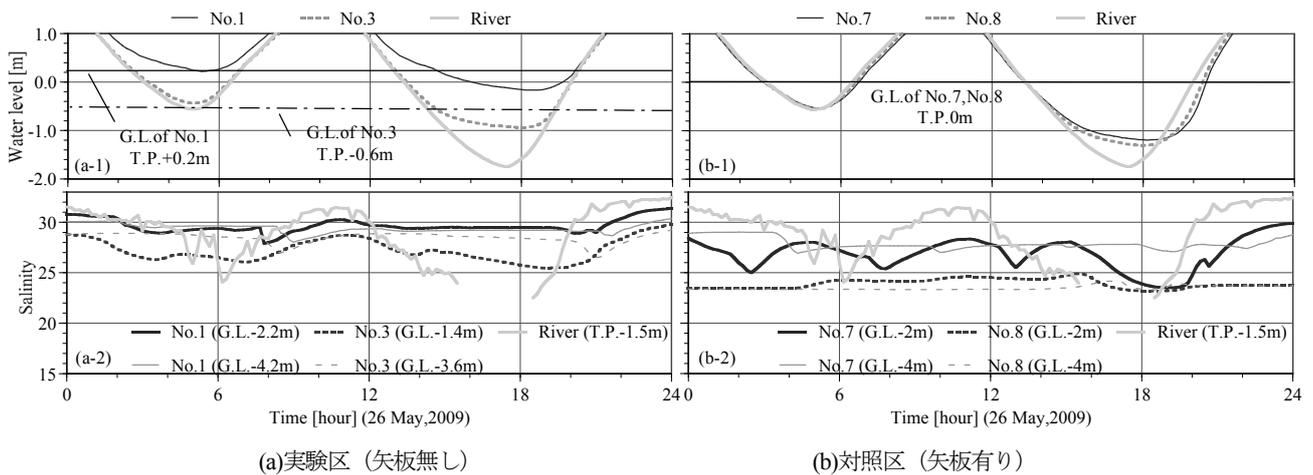


図-7 (a)実験区, (b)対照区での2009年5月26日(大潮期)の河川水と地下水の水位, 塩分変動

の影響を受け, 春期では約 1°C 低くなっていると考えられる。

また, 淡水層は矢板により河川方向の浸透・流出が制限されていることから, 降水に伴う表層水の浸透によって形成されていると予想される。また2009年と2010年の淡水層の厚さの変化は, 2008年には $500\text{m}^3/\text{s}$ を超す出水が一度もなかったこと(最大出水: $350\text{m}^3/\text{s}$), 2009年には $500\text{m}^3/\text{s}$ を超す出水が4度発生したこと(最大出水: $2100\text{m}^3/\text{s}$)から, 主に夏期に発生した降水の履歴の違いが現れているものと考えられる。

4. 矢板の有無が地下水環境に及ぼす影響

(1) 矢板の有無による干潟地盤内の地下水環境の相違

a) 水位変動

図-7には(a)実験区(矢板無し), (b)対照区(矢板有り)での2009年5月26日(大潮期)の河川水と地下水の水位, 塩分変動が示されている。図中には実線と一点鎖線で各観測井の地盤高が示されており, 機器の設置位置は図-2に示されている。

地下水位変動は実験区と対照区で大きく異なる。実験区の地下水位は干潮時でも No.1 で 15cm , No.3 で 30cm 程度の低下であり, 河川水位に比べて $75\sim 150\text{cm}$ 程度高く維持されている。また, 上げ潮時の地下水位の上昇は河川水位が No.1, No.3 の地盤高よりも低い位置にあるときから生じているため, 地下水位の上昇は河川水の直接浸透によるものではないことがわかる。

一方, 対照区の地下水位は河川水位の低下に伴って 100cm 以上低下し, 実験区よりも $70\sim 100\text{cm}$ 低下する。また, 上げ潮時の地下水位の上昇は河川水位が No.7, No.8 の地盤高よりも高い位置で生じていることから, 河川水が地盤面から直接浸透することにより地下水位が上昇していることがわかる。

b) 塩分変動

実験区の塩分変動は干潟干出時よりも満潮時に大き

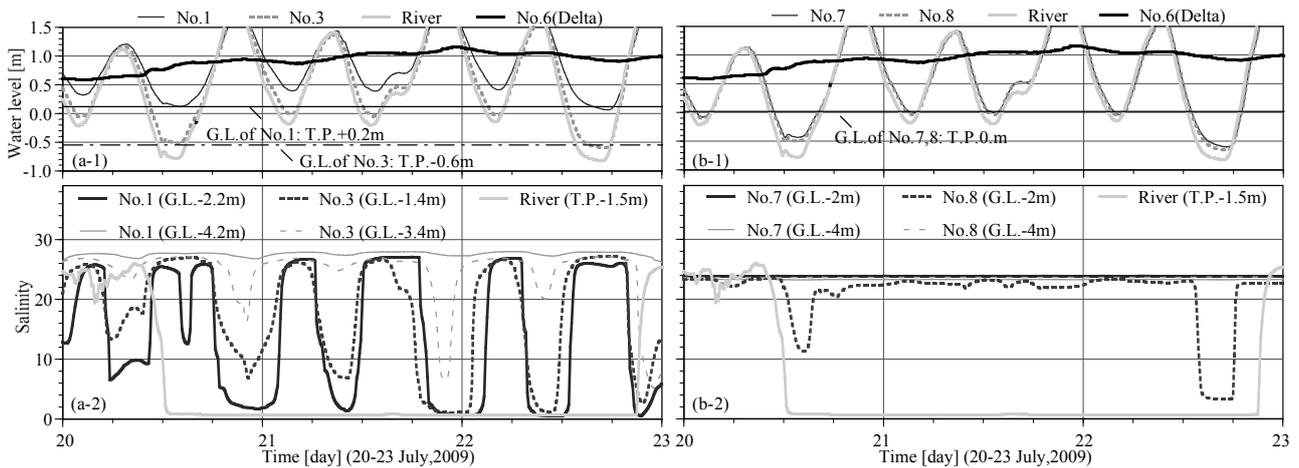
い。満潮時には, No.1, No.3 の地盤下 4m 程度まで河川水の浸透の影響が及んでいる。また, 上げ潮時には No.1 の GL.- 2.2m で8時頃に生じた2程度の塩分低下が70分後に GL.- 4.2m でも生じており, 塩分低下が表層から深部へ伝わっていることがわかる。太田川感潮域では, 河川水位がデルタ地下水位よりも高いときに干潟地盤内へ河川水が浸透することがわかっており⁵⁾, 実験区での満潮時の塩分上昇は河川水位(T.P.+ 2m)とデルタ地下水位(No.6: T.P.+ 0.3m)の水位差によって生じていることが予想される。8時頃に生じた塩分低下は地盤表層の河川水が浸透したものと考えられ, 低塩分水塊が地盤内へ浸透していることから, 密度差による浸透ではないことがわかる。

一方, 矢板が不透水層まで打設されている対照区の塩分は全地点で実験区と比較して2程度低く, No.7の GL.- 2m のみ大きな変動が確認されるが, 他の3地点の変動は1以下である。上げ潮時には, No.7の GL.- 2m で7時頃に 1.5 の塩分低下, 130分後に GL.- 4m で 0.5 の塩分低下が生じている。

これらのことから, 矢板の打設により陸域のデルタ地下水と河川水や干潟地下水の循環が制限された干潟においては, 満潮時の河川水の浸透は矢板の無い干潟と比較すると僅かであり, 塩分がほとんど変化しないことがわかる。また, 14時以降の干潟干出時には No.7, No.8 の GL.- 2m で塩分低下が確認されるが, 地下水位が地盤下 1.2m まで低下していること, 塩分が干潮時の河川水の塩分と同程度であることから, 干潟表層の河川水が浸透したものであると予想される。

(2) 出水時における干潟地盤内の塩分変動

図-8には(a)実験区(矢板無し), (b)対照区(矢板有り)での2009年7月20日から23日(大潮期)の河川水と地下水の水位, 塩分変動が示されている。図中にはデルタ地下水位として No.6 で測定された地下水位, 図-7と同様に実線, 一点鎖線で各観測井の地盤高が示されている。また, 観測期間中には河川流量が $1000\text{m}^3/\text{s}$



(a)実験区 (矢板無し)

(b)対照区 (矢板有り)

図-8 出水に伴う(a)実験区, (b)対照区での河川水と地下水の水位, 塩分変動 (図中にはデルタ地下水位としてNo.6で測定された地下水位が示されている)

を超える出水が2度発生し, 河川水が2日間程度淡水化した。

実験区では, 平水時の地盤内塩分変動に比べて著しい変動が生じており, 満潮時に地盤下2mを超えて淡水が浸透し, No.3ではGL.-3.4mまで塩分が低下している。その後, 干潮時には塩分は25程度まで急激に上昇している。地盤内への淡水の浸透は河川水位がデルタ地下水位より高くなった時に生じている。また, 河川水位がデルタ地下水位より低くなったときには, 地下水の塩分はすぐに応答せず, 2時間後に遅れて塩分が急激に上昇している。これは, 満潮時に浸透した淡水が干潮時に全て流出した後, デルタ地下水が流出しているためと考えられ, 平水時には河川水とデルタ地下水の塩分差が小さかったために顕著な差が確認されなかったが, 河川水が淡水化したことにより塩分上昇の遅れとして確認されている。一方, 対照区では満潮時の塩分変動は見られず, 実験区とは逆に干出時にNo.8のGL.-2mで塩分の低下が確認される。

(3) 地下水環境の形成機構

平水時と出水時の干潟地盤内での地下水位, 塩分変動の調査結果より, 実験区と対照区における地下水環境の形成機構が以下のように予想される。実験区(矢板無し)では河川水位がデルタ地下水位よりも高くなると, 地盤面付近の河川水が地盤内へ浸透する。河川水位がデルタ地下水位よりも低くなると, まず満潮時に地盤内へ浸透した河川水が流出し, その後デルタ地下水が流出する。一方, 対照区(矢板有り)ではデルタ地下水との循環が制限されているため, 満潮時の塩分変化は小さく, 下げ潮時には河川水位の低下に伴って1m以上地下水位が低下し, 地下水面下1m程度までの塩分が河川水の影響を受けて変化している。

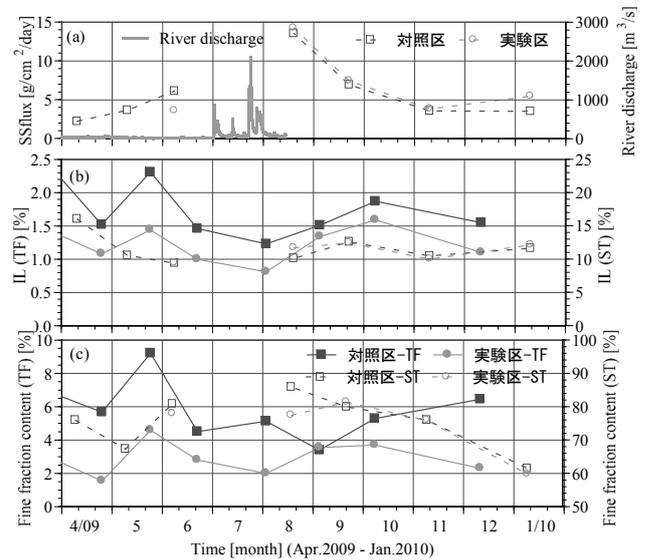


図-9 干潟堆積泥とセジメントトラップ捕捉泥の(a)SSflux, (b)IL, (c)細粒分含有率の変化 (TFは干潟堆積泥, STはセジメントトラップ捕捉泥であり, それぞれ実線, 点線で示されている)

5. 矢板の有無が干潟環境に及ぼす影響

(1) 沈降物特性と底質環境

図-9には2009年4月~2010年1月に測定された干潟堆積泥とセジメントトラップ捕捉泥の(a)SSflux, (b)IL, (c)細粒分含有率の時系列変化, 図-10にはボーリング調査から得られた(a)実験区と(b)対照区の細粒分含有率の横断分布が示されている。なお, 7月上旬に発生した4回の $500\text{m}^3/\text{s}$ を超える出水によりセジメントトラップが流出したため, 欠測期間がある。セジメントトラップの設置高さは両断面とも図-2に示すようにT.P.+0m付近である。図-10には底質採取地点が○で示されている。

図-9より, 干潟に堆積する有機泥のSSflux, ILは実

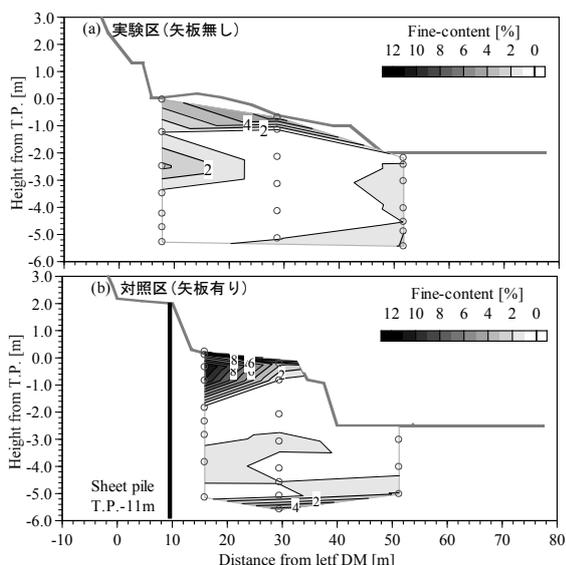


図-10 (a)実験区と(b)対照区における細粒分含有率の横断分布
(○は底質採取地点を示す)

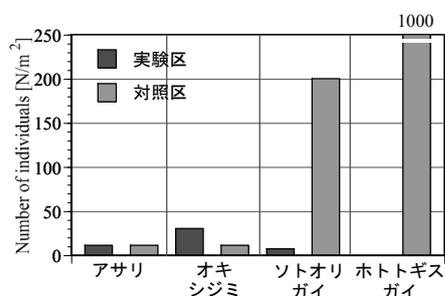


図-11 実験区と対照区に出現した二枚貝の個体数

験区と対照区で大きな違いが無いにもかかわらず、干潟堆積泥は、年間を通じて実験区より対照区の方がIL、細粒分含有率が多いことがわかる。これは、4.(1) a)節で示した実験区と対照区での地盤内への浸透傾向の違いが関係している。すなわち、実験区では上げ潮時に河川水が地盤表面から直接浸透することが無いのに対し、対照区では上げ潮時に河川水が地盤表面から直接浸透するため、河川水の浸透が干潟表面への細粒分の沈着を促進していると考えられる。さらに図-10より、干潟表層だけでなく干潟地盤下1m程度の範囲まで細粒分含有率の分布が実験区と対照区で異なっていること、No.7では地盤下1mでも8%と高い値を示していることがわかる。対照区の地下水位変動は実験区と比べて大きく、No.7で1mを超えていることから、干潟表層に堆積した有機泥が地下水位の低下に伴い地盤内へ輸送され、地盤下1m程度まで細粒分含有率が高くなったと考えられる。

(2) 生物棲息状況

図-11に2010年3月に実験区と対照区で確認された二枚貝の個体数を示す。対照区のホトトギスガイの個体数は1000N/m²であった。調査地点は図-2に示されている。

アサリ、オキシジミの個体数は同程度であるが、ソトオリガイ、ホトトギスガイの個体数は対照区で多い。対照区の干潟でソトオリガイ、ホトトギスガイの個体数が多いのは、急激な地下水位の低下とそれに伴う細粒分の増加に関係があると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 矢板背面の地下水質は河川水よりもデルタ地下水の影響を強く受けており、水質変動の少ない安定した地下水環境が形成されている。
- 2) デルタ地下水との循環がある干潟では、満潮時に河川水位とデルタ地下水位の水位差によって地盤面付近の河川水が地盤内へ浸透しており、その影響は地盤下4m程度まで及んでいると考えられる。また、干潮時には同様の機構でデルタ地下水が河道方向に流出している。
- 3) 不透水層まで矢板が打設されている干潟では、デルタ地下水との循環が制限されている。そのため、地下水位低下量が大きくなり、デルタ地下水との水位差に起因する塩分変動もほとんど生じていない。
- 4) 出水時には、デルタ地下水との循環がある干潟では満潮時に淡水化した河川水が地盤内に浸透し、急激な塩分低下が生じている。一方、矢板の打設によりデルタ地下水との循環が制限されている干潟では、塩分変動がほとんど生じていない。
- 5) 実験区と対照区に形成されている底質環境、棲息する生物種、個体数の違いは、地下構造、特に矢板の有無に起因する地下水環境の違いによるものであることが示唆された。

参考文献

- 1) 山元淳史, 土屋義人: 沿岸埋立地における地下水の挙動と護岸設計への応用, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.906-910, 1994.
- 2) トウナロン, 駒井克昭, 日比野忠史, 中下慎也: 干潟地盤内での微細粒子の移動に関する基礎的事項の解明, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1276-1280, 2008.
- 3) 中下慎也, 日比野忠史, 福岡捷二, 水野雅光: 複断面形状が形成する地下水流と河口干潟の特性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1161-1165, 2007.
- 4) 駒井克昭, 日比野忠史, 阿部徹: 太田川デルタにおける河川と沿岸帯水層の水循環, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1216-1220, 2008.
- 5) 駒井克昭, 中下慎也, トウナロン, 日比野忠史: 河川感潮域における河床間隙水と広域地下水の循環機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.1156-1160, 2009.

(2010. 4. 8受付)