

複断面形状が形成する地下水流と河口干潟の特性

Characteristics of Groundwater Flow and Tidal Flat formed by River Structure in the Estuary

中下慎也¹・日比野忠史²・福岡捷二³・水野雅光⁴

Shinya NAKASHITA, Tadashi HIBINO, Shoji FUKUOKA and Masamitsu MIZUNO

The variations of river flow by river structure created ecological tidal flat in Ota River. The formation mechanism of ecological tidal flat was analyzed by the distribution of soil environment and variation of water level and quality of the groundwater. In Ota River, groundwater level was kept high in main channel because tide pool is formed by the revetment in flood plane. The groundwater flow was occurred by the gradient of ground water level between tide pool and main channel with tidal variability. The high porosity in the tidal flat is kept by the variation of groundwater level. It is considered that tidal flat which content low organic matter is formed by transportation of organic matter which occurred by groundwater flow.

1. はじめに

太田川放水路は1969年の完成以後、河道内の整備がなされ、1975年頃には中流域に低水路護岸が構築されている。護岸天端高は概ね平均潮位高に構築されているため、満潮時に海水が遡上することで護岸の高水敷側には汽水性の潮だまりが形成されている(図-1)。低水路には洪水時に輸送された土砂が護岸前面に堆積し、砂干潟が形成されている。以後、低水路に形成された砂干潟を低水路干潟、護岸背面側に形成された潮だまりをタイドプールと呼ぶ。低水路干潟は上流域、中流域、河口域付近に発達しており、著者らが確認した1980年以降では、干潟位置、形状の変動量は小さいことがわかっている(稲葉ら, 1984)。河口から中流域に発達する干潟は海域の影響を受ける河口干潟に位置づけられる。中流域に形成されたタイドプール内には50%程度の細泥が堆積し、砂ガニの良い棲息場となっている。また、中流域に発達した低水路干潟では細泥分は数%程度と少なく、イソジミが優先した生物層が形成されており、多様な生態系が維持されている(日比野ら, 2006)。

感潮河川(汽水域)において河道が複断面形状を有する場合には、高水敷と低水路間に地下水流が形成されることが予想される。特に高水敷に潮だまりや湿地帯が形成されている場合には干潟地盤において地下水面が高い位置で維持されることが考えられる。低水路地下では地盤上層からの河川水の浸透の他に高水敷方向から流入する地下水も多くあり、高水敷と低水路間の水位差によって低水路干潟地盤内に流入する地下水の流量と水質は異なると考えられる。そのため、干潟地盤内への地下水の

流出入は多様な干潟環境を形成し、生物棲息に大きな影響を与えることが予想される。生物の良好な棲息環境を維持するために必要な溶存酸素(DO)の供給は横断面方向からの地下水流によっても行なわれるが、大気や地盤表面に付着した藻類、植物プランクトン等の影響を受けている表層水や河道からの覆流水によって供給される場合が多い。

本研究では、複断面形状を有する放水路中流域で形成されている干潟の特性を明らかにし、河道地盤内の水環境との関連から生物棲息環境の良好な干潟が形成される機構を明らかにすることを目的としている。

2. 太田川放水路己斐橋上流における地下水観測の概要

放水路中流域(河口から5.5 km地点)にある己斐橋上流干潟、干潟地盤内(地下)で行った観測の概要についてまとめる。観測は地下を含む断面内での水位、水質変動を明らかにするために、図-1に示す断面内において3本の井戸(ストレーナ付塩ビ管)を埋設するとともに既設の橋脚等を利用して水質、流速測定を行った。測定にはcompact シリーズ(アレック電子社製品)を用

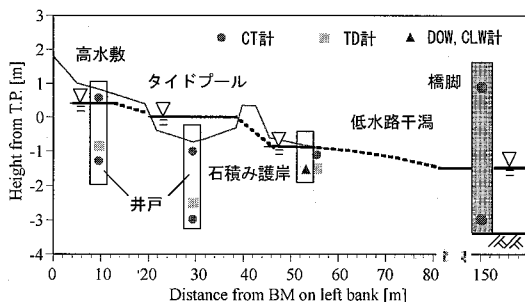


図-1 太田川放水路己斐橋上流(河口から5.5 km地点)での干潟地形と設置機器(図中の実線は図-7に示す10月8日4時(大潮干潮時)の地下水面、破線は観測水位から予測される水面勾配を示す)

1 学生会員 修(工) 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻
2 正会員 工博 広島大学准教授 大学院工学研究科
3 フェロー 工博 中央大学研究開発機構教授
4 正会員 工修 中国地方整備局 太田川河川事務所事務所長

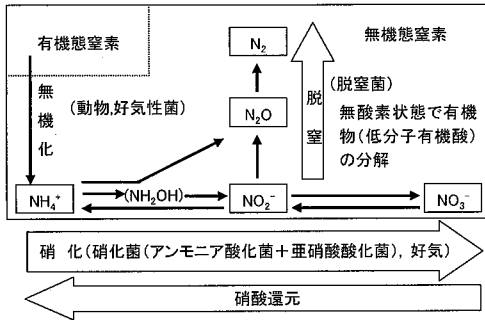


図-2 脱窒過程の概念図

いており、CT 計は伝導度、水温、TD 計は水温、水位、DOW 計は溶存酸素量（DO）、水温、CLW 計は Chl-a 量、濁度、水温をそれぞれ 10 分間隔で計測した。さらに、地下水流向流速計（ALEC GFD3A）を用いて地下水流向、流速を 1 秒間隔で計測した。また、河川水位（橋脚）は図-1 に示す已斐橋で超音波水位計によって計測した 20 分毎のデータ、河川水位（草津）は、放水路河口で国土交通省によって計測された 1 時間毎のデータを使用している。放水路河口と中流域は 5.5 km 離れており、水位の変動にはおよそ 20 分の差が生じている。

護岸周辺で形成される土壤環境、生物棲息環境を明らかにするために、低水路干潟表層から鉛直方向 10 cm 毎に強熱減量値（IL）、生物棲息量、湿潤密度、含水比、土粒子密度の測定を行った。生物棲息量は 10 cm 毎に 30 cm × 30 cm の範囲で出現したイソシジミの数（1 m² 当りに換算）とし、間隙率は湿潤密度、含水比、土粒子密度の分析結果から求めた。

3. 複断面河道周辺で形成される干潟環境

(1) 脱窒機構（図-2）

好気的な状態では有機物に含まれる有機態窒素は動物や好気性菌等によって酸化的に分解・無機化され、無機態窒素として NH₄⁺ が放出される。有機物の堆積場が嫌気的な状態であっても 2 mg/l 程度の酸素があれば、NH₄⁺ はアンモニア酸化菌によって NO₂⁻、亜硝酸酸化菌によって NO₃⁻ に硝化される。脱窒菌は NO₂⁻、NO₃⁻ が存在する場において嫌気的な状態になると、NO₂⁻、NO₃⁻ の酸素を利用して周辺の有機物（低分子有機酸）を分解し、N₂ を排出する。すなわち脱窒は好氣的、嫌気的な状態が周期的に現れることによって活性度が向上する。なお、脱窒菌は酸素が存在する場では好気性菌と同様に有機物を分解し、NH₄⁺ を排出する。しかし、嫌気的な状態が継続する場合には NO₂⁻、NO₃⁻ は消費または硝酸還元され、脱窒は起こらなくなる。さらに嫌気的な状態が続くと、硝化菌は消滅することになる。

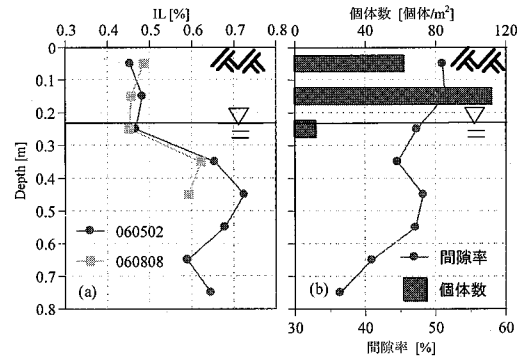


図-3 低水路干潟における (a) IL, (b) 生物棲息数と間隙率の鉛直分布（図中の実線は大潮干潮時の地下水位を示す）

(2) 生物棲息、有機物量の鉛直分布

図-3 には (a) 2006 年 5 月 2 日と 8 月 8 日に測定された低水路干潟内の IL の鉛直分布、(b) 2006 年 5 月 2 日に測定された低水路干潟内の生物棲息量と間隙率の鉛直分布が示されている。それぞれ図中には実線で大潮干潮時の地下水位が示されている。

低水路干潟において有機物の供給は主に表層で行われるが、表層から 30 cm 程度までの地下水位変動域の IL は地下水面以深の 1/2 程度である。また、間隙率は 50 % 程度（湿潤密度 1.3 g/cm³）であり、多数のイソシジミの棲息が見られる。太田川では有機物は表層から供給され、夏季は冬季の 10 倍程度の沈降量がある（夏季：約 10 g/m²/h）ことから（長戸ら、2007）、有機物の分解、消費または地下水の動きが無ければ、表層で IL が多くなるのが自然である。しかし、地下水面以深では表層付近より 2 倍程度 IL が高くなっており、地下水位の変動によって有機物が下層に輸送されていることが推定される。

(3) クロロフィルの生産と DO の供給と消費

図-4 には 2006 年 11 月 5 日～11 月 25 日の 20 日間に測定された (a) 河川水位（草津）、(b) 低水路干潟地盤下 0.5 m (T.P. -1.5 m) での DO, Chl-a 変動、(c) 日照割合が示されている。日照割合は、午前 7 時から午後 6 時までの間の日照時間の割合である。(a) には実線で低水路干潟地盤高 (T.P. -0.7 m) が示されている。

地盤下 0.5 m においても 1 μg/l 程度の Chl-a の供給があること、DO は 5 % (0.5 mg/l) 程度の貧酸素状態にある（イソシジミが大潮干潮地下水面以下で棲息していない理由）が、大潮期には 10 % (1 mg/l) を超える濃度になる時期があることがわかる。Chl-a の存在は干潟地盤内に有機物が輸送されていること、DO の変化は干潟地盤内で好氣的、嫌気的な状態が周期的に形成されていることを示している。

観測期間前半は日照量が多く Chl-a の生産が活発であ

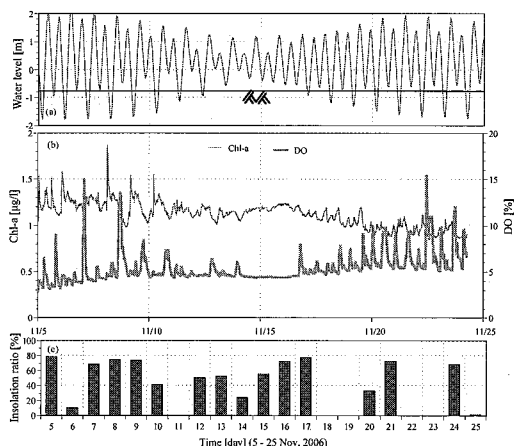


図-4 (a) 河川水位(草津), (b) 低水路干潟地盤下 0.5m (T.P.-1.5m) 地下水の DO, Chl-a 変動, (c) 日照割合 (2006 年 11 月 5 ~ 25 日, 上段図中の実線は低水路干潟地盤高 (T.P.-0.7 m) を示す)。

ったと考えられる。Chl-a の増加は低水路水位が地盤高よりも低くなった場合に観測されていることから、干潟地盤内への Chl-a 輸送は下げ潮時に行われていることがわかる。11 月 11 日頃の干潮時には干潟が干出する時間が短く Chl-a の地盤内への輸送が制限されたと考えられる。

潮汐に起因する地下浸透により、二枚貝のエサとなる Chl-a の干潟地盤内への輸送が行われている。下げ潮に伴う大潮干潮地下水位以深への Chl-a の供給は地下水位の下降等、地下水による輸送が主な要因として推定される。

11 月 17 日頃からの Chl-a の減少に伴って DO が増加しており、DO の増減に Chl-a が関連していることが予想される。半日周潮の周期で見ると、Chl-a の減少が DO の増加に伴っていること、DO の増加は大潮期に大きく、下げ潮のタイミングで起こっていることから、下げ潮に伴う地下水流の変化が DO の供給を生起していることが考えられる。Chl-a の変化は消費 (摂餌) または有機物の好氣的分解が行なわれていることを示唆しており、DO の低下は硝化に引き継ぐ脱窒が干潟地盤内で生じていることを示すものである。

Chl-a の地盤内への供給は DO の供給と相まって脱窒活性を向上させており、放水路においては生物の棲息環境の維持や有機物の浄化を促進する良好な地下浸透機構が形成されていると予想できる。

4. 複断面水路が形成する河道地盤内の水環境

地下水位変動域では間隙率が高く保たれ、有機物含有量の少ない土壌環境が形成されているため、生物棲息に良好な環境が形成されていることが考えられる。本章では干潟環境を形成する地下水の流れ場について検討する。

(1) 地下水位面の変動

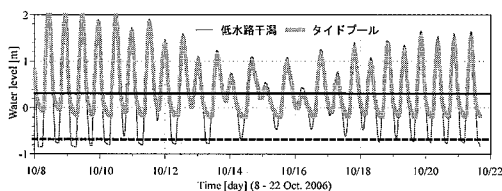


図-5 低水路干潟, タイドプールの水位変動

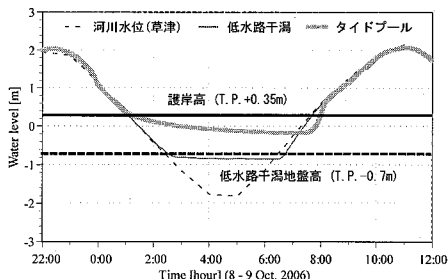


図-6 10 月 8 日～9 日の河川(草津), 低水路干潟, タイドプールの水位変動 (河川水位(草津)は 1 時間, 他は 10 分間隔の測定, 図中の実線は護岸高 (T.P.+0.35m), 破線は低水路干潟地盤高 (T.P.-0.7 m) を示す)

図-5 には 2006 年 10 月 8 日～22 日に測定された低水路干潟とタイドプールの水位, 図-6 には 10 月 8 日～9 日 (大潮期) にかけて測定された放水路河口, タイドプールおよび低水路干潟での水位が比較されている (断面形状は図-1 参照)。図中には護岸高 (T.P.+0.35 m) が実線で、低水路干潟地盤高 (護岸先端から約 10 m 地点: T.P.-0.7 m) が破線で示されている。

タイドプール水位の下降速度は土砂の堆積状態によって変化することが考えられるが、河川水位が護岸高 (T.P.+0.35 m) より低くなると、護岸によりタイドプールと低水路が分断され水位下降速度に約 3 倍の差が生じ (タイドプール: 0.08 m/h, 低水路: 0.25 m/h), 低水路に向かって水面勾配が形成される。干潮時に河川水位は T.P.-1.5 m 以下まで低下するが、干潟地盤内 (干潮時の流水際から約 30 m 地点: 図-1) では、地表面下 20 cm (T.P.-0.9 m) 程度まで地下水位が保たれていることがわかる。

干潮時に地下水位面が保たれているのはタイドプールに向かって正の水位勾配が形成され、タイドプールの水塊が表層、地下を通り低水路へ移動しているためと考えられる。タイドプールから低水路に水位勾配が形成されるために、干潟地盤表面凹地を地下水が流出しており、低水路干潟では地盤表面と地下水面が概ね一致 (地盤勾配と地下水勾配が一致, 図-1) していることを確認している。

(2) 低水路干潟地盤内への塩水流入

図-7～9 に 2006 年 5 月 27 日～8 月 8 日の 74 日間の観測結果が示されている。センサーの設置位置は図-1 に示す。図-7 には (a) 河川水位 (橋脚) と河口から約 15 km の非感潮域での出水量, (b) 干潟地盤下 0.2 m (T.P.

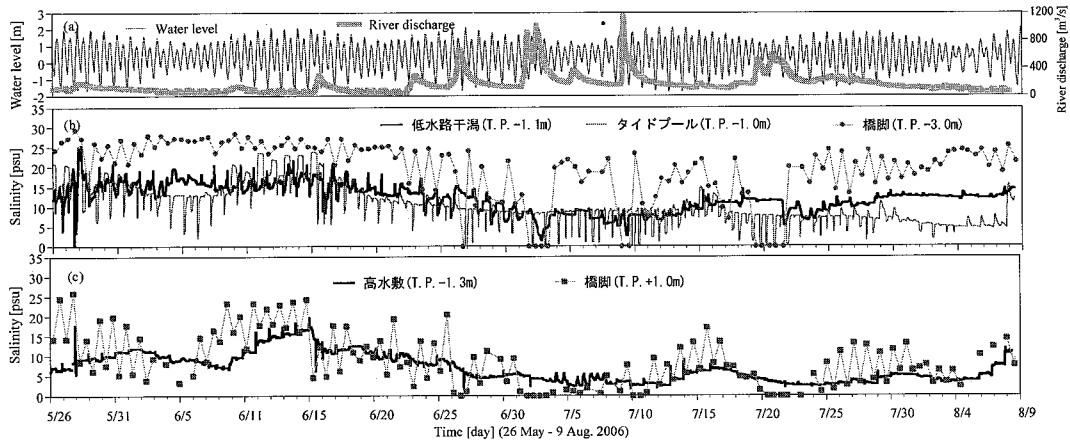


図-7 (a)河川水位(橋脚)と出水量, (b)低水路干潟地盤下0.2m, タイドプール地盤下0.5m, 橋脚(低水路床), (c)高水敷地盤下2.5m, 橋脚(表層)での塩分変動(センサーの位置は図中ではT.P.表示, 河川水の塩分は満潮時の最大塩分のみ示している)

-1.1m)とタイドプール地盤下0.5m (T.P.-1.0m), 橋脚(低水路床, T.P.-3.0m), (c)高水敷地盤下2.5m (T.P.-1.3m), 橋脚(表層, T.P.+1.0m)での塩分変動, 図-8には満潮時における高水敷地盤下0.35m (T.P.+0.5m)と2.5m (T.P.-1.3m)の塩分と水温の関係, 図-9にはタイドプール地盤下0.5m (T.P.-1.0m)と2.5m (T.P.-3.0m)の(a)満潮時, (b)干潮時の塩分と水温の関係が示されている。ただし, 図-7では河川水の塩分は満潮時における最大塩分のみ示している。

図-7から低水路干潟地盤内間隙水の塩分は10~20程度の幅で変動しており, 明確な潮汐変動(日周期)は現れていないことがわかる。低水路干潟地盤内の塩分の上昇と低下は河川水の流入が考えられるが, 出水量の増減に伴った顕著な変動は現れていない。例えば, 低水路干潟~タイドプール地下水の塩分は, 出水量の増大に伴って6月15日~25日頃までの間低下しているが, 低下した後は $800\text{ m}^3/\text{s}$ を超える出水(河川水の塩分は0)を経験した場合においても, 地盤内の塩分は10程度で維持されている。

タイドプールへの河川水の流入は河川水位が護岸高(T.P.+0.35m)を超えることで生じる。大潮期では河川水位が高い(T.P.+2.0m)ため, 遡上した海水が流入するが, 小潮期においては満潮であっても河川水位が低い(T.P.+0.5m)ため, 低塩分の河川表層水が流入する。そのため, タイドプール地下水の塩分は大潮期に上昇し, 小潮期に低下する朔望周期を持つ(平水期に顕著)。6月25日頃の大潮期において塩分の上昇が見られなかったのは出水によってタイドプールに流入する塩分が低下していたためである。

河川水(T.P.-3.0m)と低水路干潟とタイドプール地盤内の塩分を比較すると, 低水路干潟地盤下(T.P.-1.1m)にある水塊の塩分は河川水よりも低い状態に

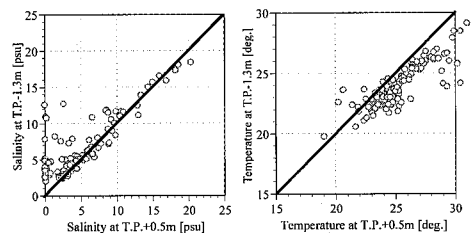
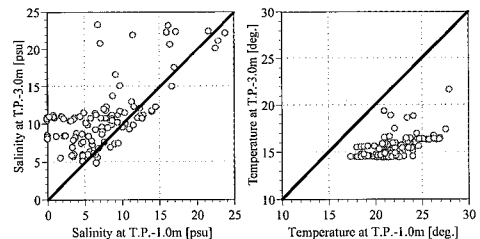
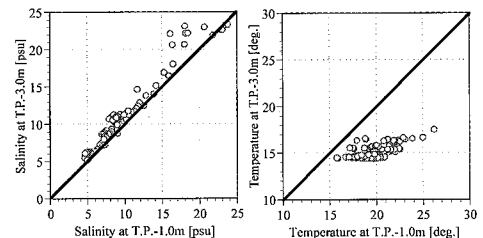


図-8 高水敷満潮時における鉛直方向の塩分, 水温の比較



(a)満潮時



(b)干潮時

図-9 タイドプールにおける鉛直方向の塩分, 水温の比較

なっていることから, 干潟地下への河川水の浸透は小さく, 地下水の塩分低下は河川水以外の水塊流入によるものと考えられる。すなわち, 低水路干潟地盤内での塩分変化は, タイドプールと低水路地表からの浸透に依存し

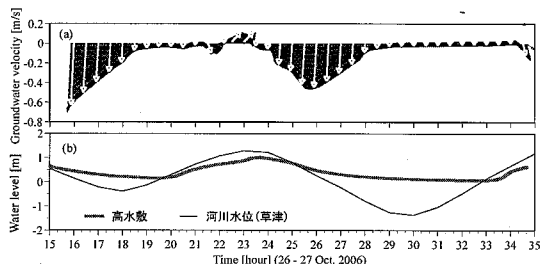


図-10 (a)高水敷地下(T.P.-1.3 m)における流向, 流速, (b)河川水位(草津)と高水敷地下水位

ていることが理解される。低水路干潟地盤への塩分の供給は河川水(海水)からのみではなく、主にタイドプール方向から行われているために安定した塩分状態が維持されていると考えられる。

7月4日以降、河川水の塩分上昇後も低水路干潟地盤内で塩分が上昇しないのは、タイドプール方向から10 psu程度の地下水が流入しているためと考えられる。さらに、7月19日の出水によって河道内に高塩分水塊が存在していないにもかかわらず、低水路のみ10 psuを超える水塊が存在している。これは小潮期の出水により低水路側の水位が高い状態に保たれ、タイドプールからの地下水の浸透が制限されたためと考えられる。

(3) 高水敷、タイドプールにおける地下水の鉛直分布

図-8, 9から高水敷では満潮時においても塩分、水温の鉛直分布が上層(T.P.+0.5 m)から深さ2.1 m(T.P.-1.3 m)まで一様となっていることがわかる。タイドプール地下においては塩分が満潮時に上層で低くなるが、干潮時には深さ方向に一様になる。これは満潮時に低塩分の河川水がタイドプールに流入し、上層に淡水が供給されるため塩分が低くなるが、干潮時になると下層の塩分に近づいているためである。

この時上層の水温は下げ潮に伴って低下していることから低水温・高塩分の水塊が上層に流入していることがわかる。水温は表層(T.P.-1.0 m)で15~25℃の変動があるのに対し、T.P.-3.0 mでは15℃程度で変化は小さい。また、高水敷地下では表層から2 mを越える深さまで塩分、水温が一様であることから、表層付近で深さ方向に一様な地下水流の存在が推測される。

(4) 高水敷地下における水の流れ

高水敷地下水塩分は、河川表層での変動に数日遅れて変動をしている(図-7(c))。図-10には2006年10月26日15時~27日11時の間に測定された(a)高水敷地下(T.P.-1.3 m)における流向, 流速, (b)河川水位(草津)と高水敷地下水位が示されている。高水敷地下での主流方向(下げ潮時に最大0.73 cm/s程度の流速)は、河川水の流下方向に一致しており、高水敷への地下水の供給は河道上流からあること、大潮満潮時にはタイドプ

ール方向からの流れが発生しており、満潮期に海水の供給があることがわかる。

これらの結果と鉛直方向に塩分・水温が一様であること、地下水流向が主に流下方向であることから高水敷の地下水は上流河川水の影響を受けていることが予想される。

5. おわりに

本論文では低水路護岸を有する河川で良好な干潟環境が形成される機構について低水路干潟の特性と地盤内の水環境との関連から検討を行った。以下に明らかになった点をまとめる。

(1) 干潟地盤内での地下水流の発生機構

太田川放水路中流域では石積み護岸の高水敷側にタイドプールが形成されているため、上げ潮時に河川水位が護岸高よりも高くなると河川水がタイドプールに流入する。また、下げ潮時に河川水位が護岸高よりも低くなるとタイドプールと低水路の間で水位差が生じ、低水路干潟へ向かう地下水流が促進される。洪水期の低水路干潟地盤内への塩分供給は主に河川水からではなく、タイドプール方向から行われているために安定した塩分状態が形成され、出水時においても10 psu程度で維持される。

(2) 地下水流によって形成される干潟環境

- 地下水流により干潟地盤下60 cm(大潮干潮時地下水面下40 cm)においてもDO(10~15%)およびChl-aの変動があり、DOやChl-a(有機物)が表層またはタイドプール方向から輸送されていることが予想される。
- 潮汐に伴う地下水位変動により、地下水位変動域では地盤が緩く保たれる。また、下げ潮時に干出するために周期的に好気、嫌気の状態が形成され、活発に脱窒が行われる。
- 複断面形状を有する低水路干潟地盤内では、地下水流により出水時においても安定した水環境が維持されており、地下水位変動により間隙率が高く、有機物含有量が低く保たれるため、生物棲息に良好な干潟が形成される。

参考文献

- 稲葉明彦・平野義明・新川英明(1984): 太田川河口域におけるベントスの分布と環境, 「環境科学」研究報告書 B-304-R01-2, pp. 135-148.
- 長戸宏樹・越智達郎・日比野忠史・福岡捷二(2007): 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.
- 日比野忠史・保光義文・福岡捷二・水野雅光(2006): 洪水に伴う河口干潟環境と生物棲息の変化, 河川技術論文集, 第12巻, pp. 431-436.
- 日比野忠史・中下慎也・花畑成志・水野雅光(2006): 河口干潟で形成される土壌環境と底生生物の棲息要件, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1031-1035.