

河口干潟地盤内での硝化・脱窒を促進する 浸透水の役割

ROLES OF GROUNDWATER IN ENHANCEMENTS OF NITRIFICATION AND DENITRIFICATION IN THE SUBSURFACE OF A TIDAL FLAT

福井勝吾¹・鮎川和泰²・管原庄吾³・清家 泰⁴・日比野忠史⁵・福岡捷二⁶
Shougo FUKUI, Kazuhiro AYUKAWA, Shogo SUGAHARA, Yasushi SEIKE, Tadashi HIBINO
and Shoji FUKUOKA

- ¹学生会員 修（工学）広島大学 大学院工学研究科（〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1）
²学生会員 修（理学）島根大学 大学院総合理工学研究科（〒690-8504 松江市西川津町1060）
³正会員 博（理学）島根大学大学院総合理工学研究科 博士研究員
（〒690-8504 松江市西川津町1060）
⁴正会員 博（農学）島根大学大学院総合理工学研究科教授 物質化学領域
（〒690-8504 松江市西川津町1060）
⁵正会員 博（工学）広島大学大学院工学研究科准教授 社会環境システム
（〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1）
⁶フェロー 工博 Ph.D 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）

In this study, we investigated groundwater flow and its effects on the enhancement of water purification in a tidal flat located in the Ota River Floodway where a tide pool forms in the flood channel. It was found that groundwater flow from the flood channel maintained the groundwater level in the tidal flat, which contributes to both the relaxation of annual range groundwater temperature and the purification of groundwater quality. It is expected that, in the case that a low-water channel tidal flat forms in the river having compound structure, the nitrification and denitrification of sediment in the tidal flat are facilitated by constructing river structure to generate groundwater flow.

Key Words : ground water flow, salinity retention, water quality distribution, delta topography

1. はじめに

河口干潟沿岸域では陸上から流入する窒素負荷量のか
かなりの部分が脱窒により浄化されている事が報告されて
いる^{1,2)}。有機泥が堆積し易い感潮河川内に発達した干潟
では、干潟地盤内での有機物の分解、掃流能力が低い場
合には干潟の泥化が進行するが、地下水の浸透能力が高
くなると泥化した干潟が砂化する速度は早い。清木ら³⁾
は、広島市周辺の河口干潟では窒素固定タイプの場合が多
く、湾内域の特性を有する還元的な干潟が形成されてい
ることを示している。

しかしながら、広島デルタを流れる太田川放水路干潟
では種々の異なった起源の地下水流れにより安定した生
物の生息環境（高い浄化能力）が維持されている。石積
み護岸によって作られた高水敷に発達したタイドプール
が形成された低水路干潟には継続的に安定した水温・塩

分の地下水を供給する流れがあることがわかっている⁴⁾。

本研究では、太田川放水路中流域（距離標；1.8K、河
口から5.4km上流）に発達したタイドプールを有する低
水路干潟（図-1）での地下水の流れと水質浄化機構につ

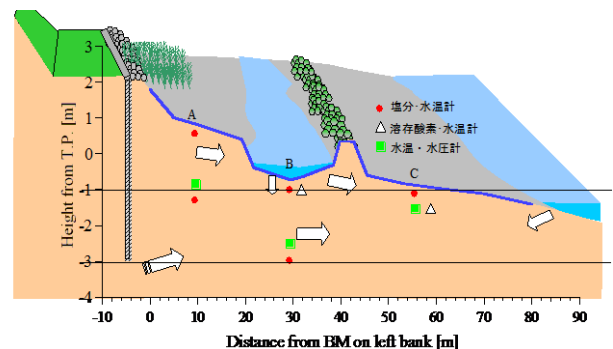


図-1 観測対象干潟での水質測定深さ
(A,B,Cは測定点、断面地形は2007年6月実測値であ
り、図-2に用いた地形と同じデータである)

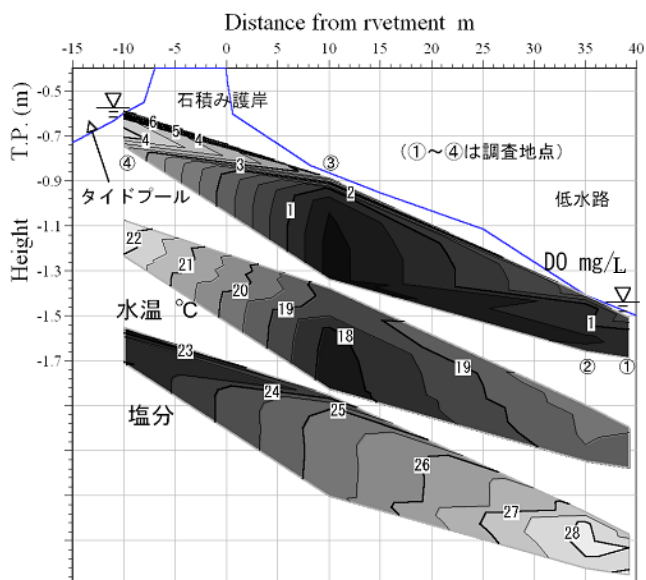


図-2 2007年6月1日観測時に放水路1.8Kに発達した干潟地形断面および大潮干潮位時のDOと水温、塩分の分布状況（縦軸はDO分布に対する深度）

いて検討している。干潟地盤での水質浄化機構を明らかにするため、2007年から断続的に干潟地盤内間隙水の水質プロファイル測定、および地盤内での地下水質分析を行い、流れ場と硝化・脱窒の関係について検討した。

海水温や降水量によって低水路干潟地盤表面に有機泥が堆積し、泥化（還元化）が進行するが、地下水流れによって還元化は地表の数cmの範囲に限定されることがわかっている⁴⁾。例えば、2007年は降水量が少なく、平年には観測されていない海産または汽水産である *Chaetomorpha* sp. が干潟上に繁茂し、干潟上の凹地には数mmの有機泥の堆積があった。このため、有機泥が堆積した砂層では表層の2cm程度が黒色（還元）化しており、ソトオリガイの生息やゴカイの棲穴が観測されている。有機泥が堆積する場では堆積層全体で強い還元状態になることが多いが、放水路干潟のように干潮時にあっても地下水流動が保持される干潟においては、有機泥の堆積により表層が還元的になった場合にも地下水流れにより地下水下では好氣的な場が形成されている。有機泥の堆積は干潟表層を還元化させるが、地下水の流動により酸化層が有機泥層下にある砂層に形成されれば、干潟の浄化（脱窒）を促進させると考えられる。

2. 太田川放水路干潟に形成される地下水環境

(1) 低水路干潟地下水面の状況

図-2には1.8Kに形成された低水路干潟の水際（①地点、②地点）、水際から約30m地点（③地点）およびタイドプール（④地点）において2007年6月1日に測定された低水路干潟地形の断面図および干潮時のDOと水温、塩分の分布（深さ方向には5cm毎に測定）状態が示されている。図中の水温と塩分分布は深さ方向に実際の高さから

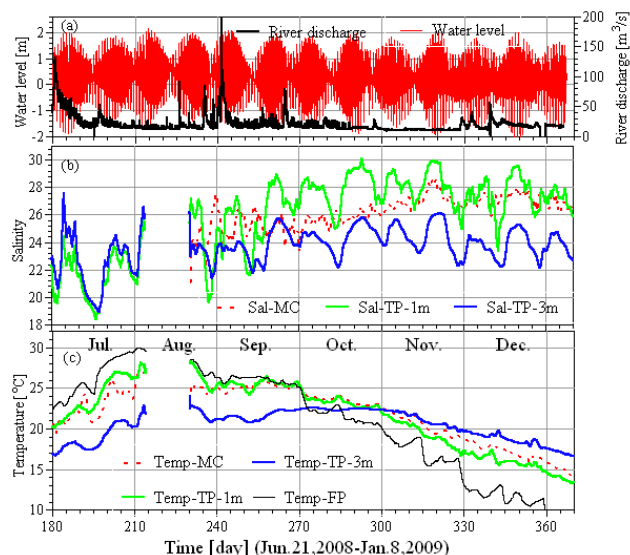


図-3 高水敷FP、タイドプールTP、低水路MC（図-1、A～C点）地盤内での水温と塩分の経時変化

ずらして示している。観測時、タイドプールの残留水の水温、塩分は22.4℃、22.1psu、流水部の河川水では20.9℃、18.7psuであった。なお、図中のDO分布の上面は観測時の地下水面を表している。干潟が干出する間、干潟面ではタイドプール方向から石積み護岸を通過した伏流水が地表に流出し再度浸透する場があり、干出期間を通して地下水面と地表面はほぼ等しいレベルにあった。

(2) 高水敷～低水路間の地形と地下水流れ

図-3には2008年6月下旬から2009年1月初旬まで測定された高水敷FP（A点、T.P.-1m）、タイドプールTP（B点、T.P.-1mと-3m）、低水路MC（C点、T.P.-1m）での地盤内の水温と塩分の経時変化が河川水位および分派前の流量（矢口第一⁵⁾）とともに示されている。観測点；A～C点および地盤高さとT.P.との関係は図-1に示されている。河川水位と流量は1時間毎、塩分と水温は10分間隔のデータを15日間で移動平均して示されている。なお、調査地点の堤防護岸にはT.P.-3mまで矢板が埋設され地下水の交流を制限しているが、矢板先端以深ではデルタ地下下との交流が行なわれている⁶⁾。

2008年は2006年、2007年に引き続き年間を通して出水の少ない年であった。8月29日（236日）に200m³/sの出水があるが、9月以降では50mm/hを大きく超える河川流出はない。200mm/hの出水の終了に呼応するようにタイドプール地盤内T.P.-1mと-3m深での塩分差が大きくなり始めている。ちなみに、出水形態が類似した2006年にも出水後に同様な塩分差が現れている⁴⁾。

河川水温の上昇期にはタイドプール～低水路で塩分が等しい値であるが、水温下降期になるとタイドプール上層の塩分が上昇している。水温は高水敷～低水路までの各地点で異なった変動を示しているが、低水路とタイドプール上層で類似の変化、タイドプール下層では上層

に比較して夏期に低温、冬期に高温となり、高水敷ではタイドプール下層と逆の変化をしている（図-3(c)）。高水敷では地盤内の数10cmが干出することから、高水敷地下には気温の影響を強く受けた河川地表水が流入していることが予測できる。この結果、後に図-7に示すようにDO濃度が高水敷地下で高い状態にある。

なお、タイドプール地盤内の間隙水塩分が朔望周期（2回/月）で変動し大潮満潮時に塩分が高くなるのは大潮期に護岸を超えてタイドプールに流入する海水量が多く、高塩分海水が浸透するためと考えられる。図-3(b)において朔望周期の変動はT.P.-1m深のみならず、T.P.-3m深でも同程度の振動幅で変動しており、タイドプールから流入する海水が2mの砂層を超えて下方に浸透していることがわかる。

(3) 地表面下数mでの地下水の動き

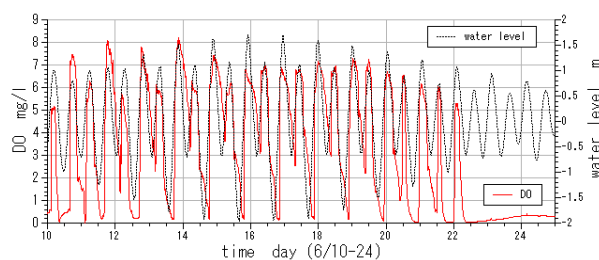
図-3(b)では、9月以降には深度の深いT.P.-3mでの塩分がT.P.-1mでの塩分より低くなっている。この時期には上層水温が下層より低い状態にあり、不安定な密度場が形成されている。さらに不安定な密度場は上下層水温の逆転後も継続している。水深の深い点で間隙水の密度が小さい不安定な状態が維持されるためには、地表面下数mの層に低密度（低塩分）の水塊の供給が継続して行なわれることが必要となる。タイドプール地盤内では不安定な密度状態が維持されており地盤下3m付近上護岸矢板下端のT.P.-3m以深からの地下水流れが常時あることが推定できる。

低水路干潟地盤内（図-2）では、18℃以下の水塊はタイドプールのT.P.-3m程度の深さ（図-3）に存在している。図-2に示す断面に形成された低い水温の水塊は、冠水に伴う干潟表層からの浸透水ではなく、地盤内下層からの流れによって維持されていることが推定できる。

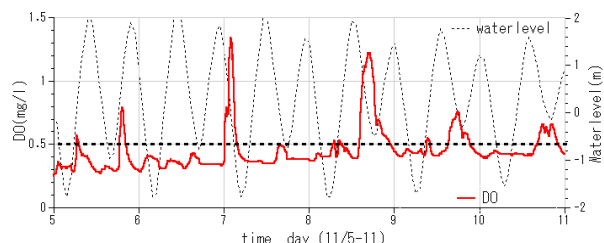
(4) 低水路干潟表層での地下水の動き

干潮時の地表面下10cmには、地下水の湧昇により河川水よりも10psu程度高い塩分状態が形成されている。図-2ではタイドプールから低水路表層に向かって低塩分で高温の地下水が流出したと考えられる水塊が形成されているが、干出して数時間が経過した地盤内に高い塩分状態（図-2中③地点では、約25psu）が見られ、塩分状態が潮汐変動の影響を受けない（図-7）ことから、低水路干潟地盤では表層流の効果を直接受けない地下水流れが形成されていることが理解できる。

前節までに示した高水敷～タイドプール～低水路地盤内での水質変動から低水路地盤内の水質分布を併せて考えればタイドプール方向からの浸透深さの異なる複数の地下水流れが存在していることが推定される。測定された種々の水質分布からタイドプール周辺での地下水の動きを図-1中の矢印のように高水敷上層～タイドプール～低水路干潟表層方向の流れ、デルタ地下～タイドプー



(a) タイドプールT.P.-1m（地表-0.3m）深での小潮～小潮期間のDO変化（2007年6月）



(b) 低水路T.P.-1.5m深（地表-0.5m）でのDO変化（2006年11月）
図-4 潮汐と地盤内DOの関係

ル地下方向の流れ、タイドプール～タイドプール地盤方向の流れ、干潟前面で地盤内に流入する流れを推定した。なお、図-3においてタイドプール地盤内上層と低水路の水温変化が類似であることは、本節で示したタイドプールから低水路に向かう表層の流れを裏付けるものである。

これらの深さの異なる流れによって石積み護岸から約15m離れた干潟地盤中央付近（図-2、③地点）で、水温は最も低く（約18℃）、タイドプールで最も高い（約22℃）状態にあり、水際には約19.5℃（河川水は約21℃）の水温分布が形成されている。夏期にはタイドプールに満潮時に溜まった高い水温の地表水（河川水）が、下げ潮に伴って干潟地盤表層に流出する流れ、流水部水際地下からの湧昇流とタイドプール方向からの地表面下数mでの浸透流により干潟地盤内の温度分布が形成されていると考えられる。

(5) 地盤内への酸素（DO）の供給

図-2では低水路地盤表層下、数cmの層内には河川水と同程度の酸素が溶存しているが、5cmよりも深くなると1mg/L程度の酸素量となっている。一方、タイドプールでは20cmを超える深さにおいても3mg/Lを超える量の酸素が溶存しており、タイドプール地盤内への表層水の浸透があることがわかる。図-4には(a)2007年6月にタイドプール地盤下0.3m（T.P.-1m）および(b)2006年11月に低水路地盤下0.5m（T.P.-1.5m）で測定されたDOの経時変化を河川水位とともに示している。低水路地盤内ではDOは最大でも1.5mg/Lに達しておらず、DO値は図-2に示したDO分布の値と一致している。これらのデータから干潟地盤表層数10cm程度の深さにおいても河川水の直接的な浸透は限定的であり、水平方向の流れが卓越していることがわかる。これに対して、タイドプール地盤

内ではDOが満潮時に5mg/L以上に上昇し、下げ潮とともに低下し、干潮時には1mg/L以下に低下している。

タイドプール地盤内には上げ潮による河川水の浸透によりDOが上昇するが、下層に向かう浸透量が少なくなると、DOが低下する。これはタイドプール地盤内で活発に酸素が消費されていることを示している。一方、水位の低下に伴って高水敷方向からの地下水（伏流水）流れも生起される（図-1）。高水敷地盤内にはタイドプール地盤内よりも高いDO濃度の間隙水が存在しており（図-7）、高水敷からもタイドプール地盤内へのDOの供給がある。ただし、この流れはタイドプール水位の低下によって引き起こされるため、高水敷からタイドプールまで浸透する間にDOが消費され、タイドプール地盤の深い層までのDO輸送は限定的であると考えられる。

低水路地盤内においても地下水面が存在する場合には酸素の供給が地下水面を通してあると考えられるが、地下水面表層で2mg/L程度でしかない状態（図-3）は干潟地盤内の地下水表層で酸素の消費が活発であることを示している。ただし、低水路地盤下50cm程度においては下げ潮時に1mg/L程度までDOの上昇が見られるが（図-4(b)）、一潮汐間を通してDOの供給が十分な状態になることはない。

3. 干潟地盤内での水質浄化機構

(1) 放水路干潟（タイドプールのある構造）における有機物の浄化

図-5に硝化、硝酸還元、脱窒過程における窒素循環の流れを示した。嫌気、好気的な状態に関わらず有機物の分解過程では無機態窒素として NH_4^+ が放出される。2mg/L程度以上の酸素がある状態になると、アンモニア酸化菌によって NH_4^+ から NO_2^- が、さらに亜硝酸酸化菌によって NO_2^- から NO_3^- が生成される。 NO_2^- 、 NO_3^- が存在し、無酸素状態になると脱窒菌は NO_2^- 、 NO_3^- の酸素を利用して呼吸（周辺の低分子有機酸を分解）し、 N_2 を排出する。脱窒は無酸素状態と有酸素状態が時空間的にタイミングよく交互に現れることによって活性度が向上する。脱窒菌は酸素が存在する場では好気性菌と同様の働きをし、有機物を分解し、 NH_4^+ を排出する。しかし、無酸素状態が長期に継続する場合には硝化菌は消滅し、脱窒がおこらなくなる。酸素が十分に供給されない干潟では硝化が律則となる場合が多い³⁾。太田川放水路1.8K付近では高水敷にタイドプールが存在すること、太田川デルタ地下からの継続的な地下水流があることによって干潟地盤内に酸素が供給される流れ場が形成され、この流れ場によって硝化活性および脱窒活性の高い状態が形成されていると考えられる。

(2) 低水路干潟地盤内での窒素の挙動

図-6は干潮時に低水路干潟の地表面下10cm、30cm、

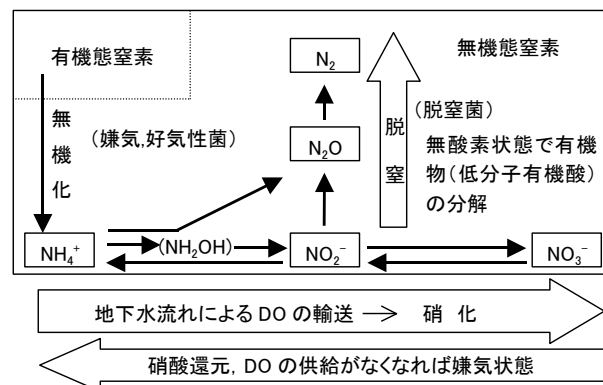


図-5 窒素循環

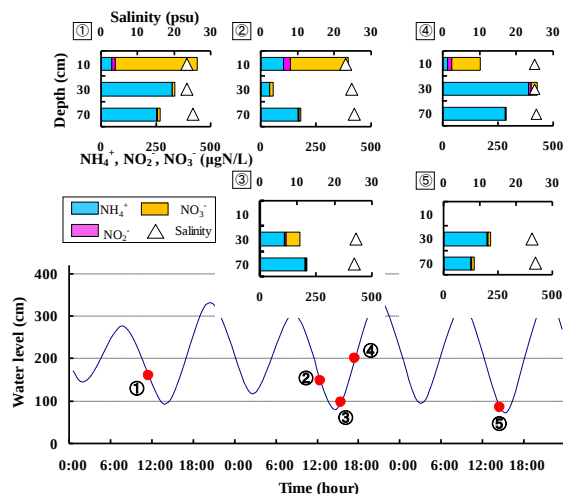


図-6 低水路干潟間隙水における窒素化学種(NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^-)および塩分の鉛直分布と調査時の河川水位（2007年10月7～9日）

70cmの深さにおいて、水位変化図の①～⑤に採取された間隙水内に含まれる窒素化学種(NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^-)の濃度の変化を示している。低水路干潟に存在する間隙水は、 NH_4^+ で占められているが、下げ潮時（①、②）に10cm層で NO_3^- が増加する現象が見られる。これは地下水面からの酸素の混入による硝化に起因するものと考えられる。2.(5)節で述べたように、低水路干潟の地表面下50cmを越える深さにはDOの供給量が少ないことを裏付けるように10cm深で NO_3^- が高いが、30cm以深になると窒素は NH_4^+ として存在している。すなわち、低水路地盤内の窒素化学種の濃度とDOの分布状態と低水路周辺での流れ場を考えると、脱窒が活性化するのは地下水位の低下が起こる地表面から数10cm程度の範囲であると考えられる。地下水流がある場では地下水面が地表面に近い（2cm深）場にあっても10cm深では酸化状態（ORP≒0mV）にあり、地表面下数10cm程度にはタイドプール方向からの伏流水が流れている。タイドプール方向からは地下水の継続的な流れがあり、地下10cm程度には干潮期の地表からの活発な酸素供給があり地下水表面で硝化が促進されていると考えられる。

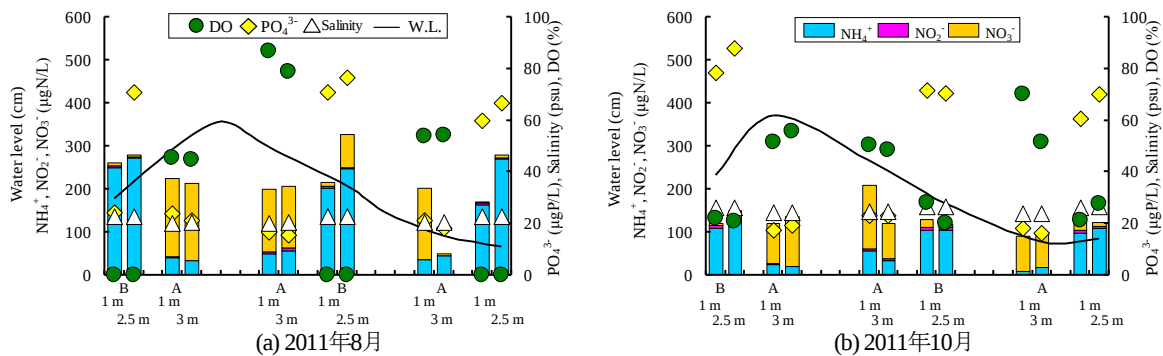


図-7 高水敷 (A) とタイドプール (B) 地盤内での栄養塩とDOの潮位に伴う変動 (横軸は時間、20分/目盛)

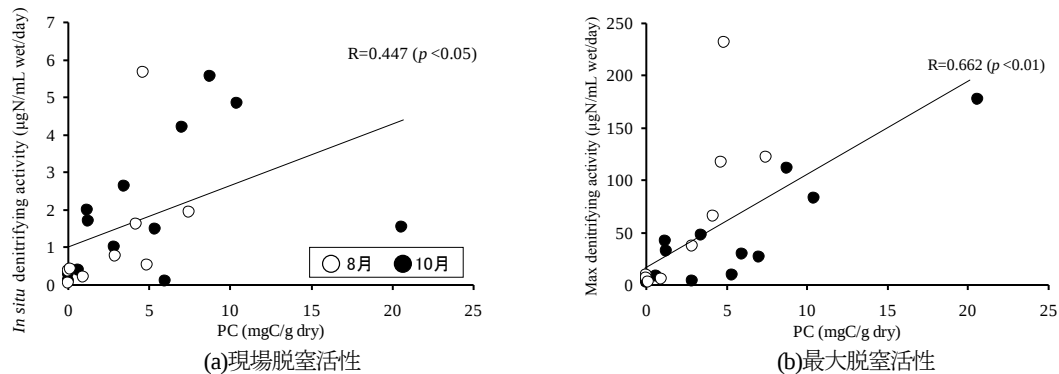


図-8 太田川放水路河口から5.4km (1.8K) までにある干潟での脱窒活性と有機物量 (PC) との関係 (2011年8月と10月の調査結果)

(3) タイドプール周辺の地下水および干潟間隙水の窒素の挙動

図-7には2011年の8月と10月に測定した1.8K地点の高水敷 (地表面下1m ; T.P. 0.2mと3m ; T.P.-1.8m) ~タイドプール地盤内 (地表面下1m ; T.P.-1.7mと2.5m ; T.P.-3.2m) の間隙水中に存在する窒素化学種 (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+), $\text{PO}_4\text{-P}$, および潮位変化に伴うDOの変動が示されている。図の横軸は時間軸であり、1目盛は20分である。地盤表面に有機泥が多く集積される構造を持つタイドプール地盤内で全窒素量は高水敷地盤内よりも多い傾向にあるが、その差は $100\mu\text{gN/L}$ 程度の差でしかない。

それぞれ深度別に窒素化学種についてみると、植生がヨシ帯の高水敷地下では、潮汐変動に関係なく深さ3mにおいても NO_3^- が高濃度 (畑系地下水の特徴) で、DOも十分存在しており (50~80%)、酸化的な状態にあることから、活発な硝化反応が起こっているものと考えられる。これに対し、タイドプール内では、高水敷とは異なり、上、下層とも窒素のほとんどが NH_4^+ で占められている (水田系地下水の特徴)。 NH_4^+ 濃度は下層で高い傾向にある。なお、窒素濃度は10月に低下しており、8月に比べて硝化・脱窒が促進されていることがわかる。

高水敷~タイドプール間では無機態窒素のうち、硝酸態窒素の占める割合が高い高水敷からの地下水や表層からの酸素を含有しているが、タイドプール地下に浸透する過程においても脱窒が進行していると考えられる。8月のタイドプール地盤2.5mでは、無酸素状態にもかかわらず下げ潮時に NO_3^- が生じており (図-7(a))、高水敷

方向からの地下水の流れを裏付けている。10月には2.5m深までDOの供給があり (図-7(b))、地下水面から数mの範囲で硝化が起こっていることが裏付けられる。また、10月にはDIN濃度が低下しており、 NO_3^- の出現とDIN濃度の低下は、活発な硝化・脱窒反応が起こっていることを示唆している。

一般に脱窒活性は、堆積物表層部で高い傾向を示すが、タイドプール地盤内では、深い層まで高い活性を有することが一連の調査により見出された。このことは、深い層に定常的なDOもしくは NO_3^- の供給があることを意味する。つまり、脱窒活性の大きさからタイドプールの表層からタイドプール地盤内、および高水敷地盤からタイドプール地盤内に向かう流れによって NO_3^- とDOを含む地下水が輸送されていることが裏付けられる。

(4) 地下水の流れがある干潟の脱窒能

2011年8月と10月に放水路干潟の河口~上流5.4km (1.8K) までの10点で単位面積当たりの脱窒能を測定した。脱窒活性はアセチレン阻害法、硝化活性は0~7日間の培養による無機窒素化学種 ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$) の増加量から算出した。脱窒活性・硝化活性ともに表層0~2cmを採取測定した。さらに、同測定点ではシーページメーター (500×500×200mm) を用いて干潟表面からの湧水量を上げ潮、下げ潮時に測定した。全ての地点で湧水が確認できた。湧水量は8月よりも10月に多く、下げ潮で多い傾向にあった。下げ潮時に湧水が多いのは1.8Kと同様に、高水敷方向から低水路干潟に向かう地下水流出機構が形成されているためと考えられる。

図-8には2011年8月と10月に測定された(a)現場脱窒活性と(b)最大脱窒活性が有機物量(PC)との関係で示されている。図中の実線は相関Rの近似線を示している。PCと脱窒活性に相関があるのは脱窒細菌等の微生物は従属栄養細菌が多く有機物を必要としているためである。河口から5.4km上流の範囲にある放水路干潟10地点での単位面積当りの脱窒量の平均値は8月には7.5mgN/m²/day, 10月には9.9mgN/m²/dayであった。放水路干潟では中海の2.2 mgN/m²/day, 穴道湖の7.3 mgN/m²/day (2005年夏季～2007年春季の年平均) に比較して高い値が得られた。

特に、8月のタイドプール(1.8K)での脱窒活性は27.8 mgN/m²/dayと高く、低水路の10倍以上の活性度であった。脱窒活性が高い干潟は輸送される有機物量に対して有機物が効率よく分解し、生産されたNH₄⁺-Nの硝化が効率よく起こり、有機物泥の浄化(脱窒)能力が高い干潟であると言える。

低水路に比較してタイドプールの脱窒活性が高いのは、過富でない利用可能な有機物の存在と高水敷地下水の移流に伴う高濃度NO₃⁻の供給がタイドプールで大きいと考えられる。タイドプール周辺での脱窒活性の高いことや窒素の状態(有機物分解、硝化反応)からもDOを供給できる種々の地下水の流れ(図-1)があることが裏付けられる。

図-9には1.8Kを除く各地点での下げ潮時の湧水量に対する現場脱窒活性の関係を示した。脱窒活性は図-9に示したように有機物量(PC)に依存する関係があるが湧水量との間にも正の相関があることがわかる。太田川放水路では1.8K以外においても放水路干潟には高水敷から低水路に向かう流れが形成されており、この地下水流れの存在が放水路干潟での水質浄化を促進していることが理解できる。干潟が発達する複断面河道では地下水の流れを作る構造があることにより河川水質の浄化が期待できる。

5. おわりに

本論文では感潮河川である太田川放水路において高水敷にタイドプールが存在する干潟に形成される地下水流れとその流れによって促進される水質浄化について検討した。複断面構造を有する干潟における高水敷方向からの地下水流れは干潟地盤の地下水位の保持、地盤内水温の年較差の緩和のみならず水質浄化にも寄与していることを明らかにした。以下に本結論の根拠をまとめる。

(1) 放水路1.8Kにある高水敷にタイドプールを有する低水路干潟では潮汐に起因した太田川デルタ地下からの地下水流れ、高水敷から低水路に向かう表層水(伏流水)流れおよび河川水浸透により複数の地下水流れが形成されている。

(2) 溶存酸素(DO)は潮汐の影響を直接受ける表層水によって供給されており、高水敷方向のみならず、自由

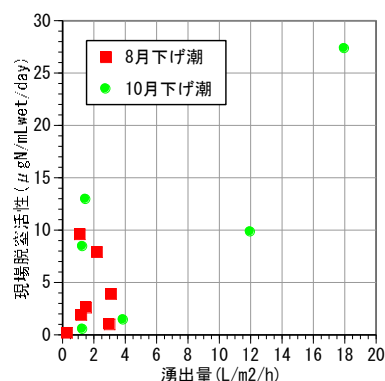


図-9 下げ潮時の湧水量に対する現場脱窒活性の関係

水面を持つタイドプール表層からの供給もある。タイドプールでは冠水状態においても潮汐変動に伴った地盤内へのDOの供給があるため、タイドプール床表層のみならず地盤内においても脱窒能力が高い。

(3) 低水路干潟地盤の地表下約20cm深では高水敷方向から流入する地下水が干潟地盤へ浸透河川水よりも支配的であった。高水敷方向からの酸素供給が少ない地表面下20cm程度以深では脱窒能が低い。

(4) 干潟地盤内には嫌気的な場と好気的な場が潮汐周期で形成されている。潮汐周期での溶存酸素量の変化はバクテリアの活性を向上させ、有機物の分解に引きつづく硝化脱窒によって干潟地盤内での水質浄化を促進させている。

(5) 地下水が酸素を取り込むことのできる環境づくりが、底質浄化機能(硝化・脱窒)を活性化させる重要なポイントであり、デルタを流れる太田川放水路のような高水敷を有する感潮河川ではDO供給機構を有効に活用できる。

参考文献

- 1) Trimmer M, Nedwell DB, Sivyer DB, Malcolm SJ. Seasonal benthic organic matter mineralisation measured by oxygen uptake and denitrification along a transect of the inner and outer River Thames estuary, UK. Mar.Ecol.Prog.Ser.2000;197:103-119.
- 2) Seitzinger SP. Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: Ecological and geochemical significance. Limnol. Oceanogr.1988;33:701-724.
- 3) 清水 徹, 伊達悦二, 岡田光正: 干潟および沿岸海底における脱窒と窒素固定, 日本水産学会誌, 74(4), 678-687, 2008.
- 4) 日比野忠史, 駒井克昭, 福岡捷二, 水野雅光: 河口干潟地盤内水環境に及ぼす浸透河川水の影響, 水工学論文集, 第52巻, pp.1309-1314, 2008.
- 5) 国土交通省: 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>.
- 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(2), pp.1146-1150, 2006.

(2012. 9. 30 受付)