複断面河道に形成された河岸干潟の 底質環境と浸透特性に関する研究 SOIL ENVIRONMENT AND INFILTRATION FLOW IN TIDAL FLAT AT RIVERBANK OF A COMPOUND CHANNEL

駒井克昭¹・中下慎也²・TOUCH NARONG³・日比野忠史⁴ Katsuaki KOMAI, Shinya NAKASHITA, Narong TOUCH, and Tadashi HIBINO

¹正会員 博(工) 北見工業大学准教授 工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165) ²正会員 博(工) 広島大学特任助教 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1) ³学生会員 広島大学博士課程後期 大学院工学研究科 (同上) ⁴正会員 博(工) 広島大学准教授 大学院工学研究院 (同上)

Functions of low water revetment in a tidal compound channel were investigated in terms of soil environment and infiltration flow as an ecological revetment by field observations. Transport of organic content and fine fraction of soil were accumulated at the depth of -20 cm in tide pool. Turbid water containing fine particle at water surface was supplied to the tide pool during flood tide. Turbid matter is transported down to the deep layer due to hydraulic gradient, whilst tidal infiltration flow occurs weakly in the surface layer. Variation ratio of the hydraulic gradient to low water level was increased by the sedimentation due to floods. Influence distance of the tide pool water on salinity distribution expands with the decrease of low water level in main channel.

Key Words: Groundwater, tide pool, soil properties, hydraulic gradient, salinity

1. はじめに

感潮河川における底質環境はベントスの生息にとって 重要である.例えば、二枚貝の塩分や高温耐性、適性粒 度は古くから研究されており^{1),2),3}、アサリの場合、成貝 が長期的に耐性を有する場合でも稚貝や幼生は数時間か ら数日の気象イベント的な塩分変化への耐性が比較的に 弱く、年変動の要因であるという指摘もある¹⁾.ベントス にとって堆積物中の植物性プランクトンやそのデトリタ スの鉛直分布も重要な生息条件である⁴⁾.

太田川感潮域は最大4mの潮差があり,河岸には多様 な生物が生息する河口干潟がみられる.放水路中流域の 湾曲部下流には低水護岸前面に安定した砂質干潟が形成 されており,距離標1k800地点では干潮時に低水護岸背 面にタイドプール(潮だまり)が現れる.この潮汐に伴 って生じる低水路とタイドプールの水位差が浸透流の駆 動力となって地下水の循環を引き起こし,底生生物の安 定した生息環境が形成されている^{5,6,7,8}.一方,このよ うな地形や水理条件を持つ河川干潟では干潟内部の動水 勾配が浸透流の構造にとって重要であるが,タイドプー ル底部の透水性も干潟に供給される懸濁粒子の粒径や堆 積された底質によって変化し,河岸干潟の浸透流の影響 範囲や継続時間,ひいては堆積物中の有機成分やその分 布特性を決める重要な要素となるはずである.

本論文では、複断面河道の低水護岸の前面に形成され た干潟環境の形成メカニズムを底質環境と浸透特性の点 から検討することを目的としている.まず、低水護岸周 辺における干潟底質の鉛直分布と河川水の流速・濁度の 断面分布の現地観測結果から、浸透流と底質分布特性の 関係、および河川水による懸濁粒子の供給メカニズムを 検討した.次に、地中の塩分変動と地下水面勾配の現地 観測結果から、タイドプールでの透水性と間隙水の挙動、 および変動特性を明らかにした.最後に干潟内塩分の断 面分布の連続観測の結果に基づき、タイドプール起源の 浸透流の影響範囲とその潮汐変動特性を明らかにした.

2. 調査手法

図-1 は太田川デルタと調査地点の平面図を示している. 距離標 1k800 地点に位置する己斐地点の河道は高水敷と 低水路からなる複断面の河道形状を有している.図-2 は 観測地点の河床の横断面形状を現しており,低水路(図 -2 中の MC)の河岸に捨石からなる低水護岸が構築され ている.干潮時に高水敷上にタイドプール(潮だまり, 図-2 中の TP)が形成される.



図-1 太田川感潮域における調査地点

(1) 干潟底質分布と流速・濁度分布の観測

2008 年 12 月 15 日に低水路干潟(MC-1~5)とタイド プール(TP-1 と 2)の表層から深さ約 40 cm までの強熱 減量(IL),濁度,含水比,およびクロロフィル a(Chl-a) 濃度の鉛直分布を測定した. Chl-a 濃度と濁度は干潟材料 を 2.0 リットルの水に溶かして撹拌後に懸濁水を光学式 センサ(多項目水質計 AAQ1183, JFE アドバンテック製) を用いて測定した.

2007年2月3日には己斐地点の直下流の己斐橋において低水路内の流速と濁度の断面分布を測定した.同時に、メモリ式電磁流速計(Compact EM, JFE アドバンテック 製)によって干潟直上27 cmの流速を毎時測定した.

(2) タイドプール底部への浸透と水位差の調査

2008年5月5日から19日にかけて低水路干潟(MC-3) とタイドプール(TP-1)において河床面直上の河川水と 地中塩分の同時連続測定を行った.測定はGL(地表面) +5 cm, GL-10 cm, およびGL-30 cm で行った.

また,2004年~2009年にかけて断続的にタイドプール (TP-1)と低水路干潟(MC-3)での地下水位を測定し, それぞれの測定期間においてタイドプールと低水路干潟 の水位を比較した.

(3) タイドプールからの浸透流の影響範囲の調査

2010年1月22日~2月3日において捨石護岸から低水 路干潟にかけて河床直上の表流水と地中の塩分,および 地下水位の横断分布を連続測定した.測定地点は低水路 干潟の MC-1,3,および5であり,各地点での測定高は GL+10 cm と GL-10 cm である.塩分はメモリ式水温・塩 分計(Compact CT, JFE アドバンテック製),地下水位は メモリ式水深計(SERA Diver, Eijikelcamp 製)を用いて



10分間隔で測定した.また,MC-5のGL+5cmで現場用 レーザー式粒度分布計(SEQUOIA製,LISST-100X)を用 いて河川水中の懸濁粒子の粒度分布を10分間隔で測定した.

2009 年 12 月 7 日には、赤外線サーモグラフィー (NEC/Avio 赤外線テクノロジー株式会社製, Thermo Shot F30)を用いて捨石護岸の低水路側と高水敷側の熱画 像と可視画像を撮影し、地表面の温度分布を測定した.

3. 干潟底質分布と濁質の供給機構

(1) タイドプール底質の鉛直構造と粒度分布特性

図-3 は低水路干潟とタイドプールの河床材料の粒度分 布を示している.低水路干潟とタイドプールの表層(約 GL-5 cm)は2008年3月、タイドプールのGL-1mとGL-3 mは2006年4月に採取されたものである.低水路干潟と タイドプールの表層のD₅₀はそれぞれ0.4 mmと0.25 mm であり、低水路に比べて粒径75 µm未満の細粒分含有率 が93%と高く、透水性が低い.一方、タイドプールの地 中深くのGL-1mとGL-3mの砂は細粒分が少なく、低水 路表層とほぼ同程度の透水性を有していると考えられる. タイドプールで2003~2005年までの3年間、計21回採 取されたセジメントトラップで捕捉された平均の細粒分 含有率は約86%であり、タイドプールには粒径の小さい 濁質が供給、堆積されている.

(2) タイドプールの底質の鉛直分布特性

図-4は低水路干潟とタイドプールの表層から深さ約40 cm までの IL, 濁度, および含水比の鉛直分布を示している. 2006 年 5 月~8 月にかけて MC-2 付近で測定された IL は最低地下水面付近の深さ約40 cm 程度に最大約0.7% のピークが見られている⁸が, MC-4 (大潮干潮時の汀線



図-4 低水路干潟とタイドプールの底部表層における底質の鉛 直プロファイル (2008 年 12 月 15 日)

より約1m岸側)とMC-5(約1m流心部側)では底部表層でILが1.5%以上ある.観測年の特徴として,2008年からアオサの繁茂が多かったため,底部表層への有機物供給が影響したことが考えられる.一方,GL-10~-15 cm層でのILは低水路で0.7%以上あるが、タイドプールではそれよりも最大0.4%も大きい.特に、タイドプール内の低水護岸寄りのTP-2ではGL-15~-20 cmまで1.0%を超えている.これは、底部表面で有機物が供給されるものの、低水路干潟ではGL-15 cm以深への輸送量が小さく、タイドプールでは逆に大きいことを示している.

図-5 は低水路干潟とタイドプールにおける IL と単位 濁度当たりの Chl-a 濃度の関係を深さ別に整理したもの である.図より,IL と単位濁度当たりの Chl-a 濃度は対 応が良く,有光層で藻類が生成されるために Chl-a 濃度は 低水路干潟表層で高く,特に MC-4 ではアオサの繁茂の 影響で顕著に値が高い.一方,表層を除けばタイドプー ルの方が-15~-20 cm 層まで Chl-a 濃度が高い傾向にある. これはタイドプールでは冠水時間が長いため藻類の生成 量が多く,藻類起源の有機物を多く含む滞留水が地中に 浸透・輸送されて集積していることを示している.また, タイドプールには 10~20 cm の深さの巣穴を掘るコメツ キガニが優占して棲息しており,その影響も考えられる. 常時水没しているタイドプール中央の TP-1 では GL-5 cm 以下の層で濃度が表層より低いのは,タイドプール中央







図-6 己斐橋での流速と濁度の断面分布の経時変化.背景の濃 淡は流速(上流向きが正,単位: cm/s),縦の線散布図は 濁度のプロファイルを示す.干潮:4時13分,満潮:10 時40分.

では水面勾配がなく,浸透流速が小さいためと考えられる.2006年には低水路干潟(MC-2付近)面下0.5mにおいて1µg/1程度のChl-aの供給があること,DOは0.5mg/1程度の貧酸素状態にあるが,大潮期には1mg/1を超える 濃度になる時期があった⁸⁾.Chl-aの存在は有光層で生成された藻類などの植物性の有機物が干潟地中に輸送されていることを示すが,細粒分が集積している表層を除けば干潟材料の透水性は高いため,底面付近の動水勾配の大きいタイドプール内では低水路干潟に比べて地中への 有機物の輸送が顕著である.





(3) タイドプールへの濁質の輸送機構

図-6 は己斐地点の直下流の己斐橋から測定された低水路内の流速と濁度の断面分布の経時変化を示している.特に上げ潮の干潮付近(図-6(a))には全層で2ppmを越える濁度が発生し、表層では4ppmを越えている.水位が低水護岸を超える時間帯に水面付近で濁度が高いことは細粒分が流れの弱いタイドプール側に供給される原因となる.図-4 で示された濁質は低水路中央に近いほど多い.これは、干潟域では冠水に伴って表層に堆積した濁質が再懸濁し、上げ潮初期の濁水の起源となっていることを示している.

4. タイドプール底部への浸透と水位差の特性

(1) タイドプール底部への浸透特性

図-7は(a)大潮期と(b)小潮期の放水路河口(草津,国土



図-8 干潮時における低水路干潟とタイドプールの水位の関係 (括弧内の数値は測定した M2潮のサンプル数)

交通省所管) での潮位(a-1, b-1), タイドプール中央 (TP-1) での滞留水(表面水)と底部の塩分(a-2, b-2),および低水 路干潟 (MC-3) での河川水と干潟表層の塩分(a-3, b-3)の 経時変化を示している.表層の透水性が高い低水路干潟 では半日周期の塩分変動が現れているが、タイドプール では変動が小さい. タイドプールの滞留水の最大塩分は 観測期間中に低下しており、7~9日では高高潮で30を超 えるが,16~19日では26程度であり,満潮の水位が低く 海水の遡上が弱いために低水路側の河川水の塩分濃度が 低く、タイドプールに流入する塩分が下がったことが原 因である. タイドプール底部の GL-10 cm の塩分は 7~9 日の間に半日周潮を4回経験し、塩分は徐々に約1上昇 しているが、GL-30 cm は塩分が約 0.6 低下する傾向にあ る.一方,16~19日ではタイドプールの滞留水の塩分が 約0.4 上昇する一方で、底部の塩分は約1低下している. タイドプールの GL-30 cm では底部表層よりも塩分が低 く,水位差による動水勾配によって低塩分水が地中に浸 透している. タイドプール底部の表層の透水性が低いた め, GL-10 cm よりも塩分変化に遅れが生じている.

以上のことから、タイドプール底部の表層部は細粒分 が多く透水性が低いものの、低水路との間の動水勾配に よって表面水が地下に浸透するため、河川水の塩分変動 に対応して地中塩分が変化している.先に示した地中の 有機物や Chl-a, 濁質(細粒分)も同様に、潮汐に伴って 表層から深部まで浸透するため、低水路と比べて鉛直方 向に比較的に一様な底質分布を形成している.

(2) タイドプール~低水路干潟間の水位差の特性

図-8 は 2004~2009 年における低水路干潟(MC-3)の 水位とタイドプール (TP-1)の水位の関係を示している. なお,縦軸のタイドプールの水位は低水路水位を基準高



図-9 (a)澪筋部 (MC-5)の水位, (b)低水路干潟 (MC-1, 3)の地下水位, (c)表流水の塩分, (d)地中の塩分,および(e)河川水中の 懸濁粒子の細粒分 (粒径 75 µm 未満)と粗粒分 (粒径 75 µm 以上)の濃度の経時変化. (b)では澪筋部底面が基準高



(a)低水路 (b)タイドプール 写真-1 低水路とタイドプールでの熱画像(右)と可視画像(左)(2009年12月7日撮影.熱画像は濃い部分が低温部分)

としており、タイドプール~低水路干潟の間の浸透流の 動水勾配に相当する.2004年7~8月ではタイドプールの 水位は相対的に低いが、10月以降はタイドプールの水位 は高く、2009年まで水位差は大きく維持されている.こ れは2004年8月末~9月上旬に台風16号と18号に伴う 出水があり、土砂の堆積によって低水護岸やタイドプー ル~低水路干潟の間での透水性が低下していることを示 している.2005年9月には台風14号に伴って既往最大(ピ ーク流量7,200m³/s)の出水が発生したため、2007年には さらにタイドプールの水位が上昇し、水位差が大きくな っている.その後、大規模な出水がなかったため、2009 年にはタイドプールの水位差は小さくなっている.

5. 浸透水と河川水による物質輸送

(1) タイドプール浸透水の影響範囲

図-9 は(a)澪筋部(MC-5)水位,(b)低水路干潟の地下 水位,(c)河川水塩分,(d)地中塩分,および(e)細粒分(75 µm 未満)と粗粒分(75 µm 以上)の懸濁粒子濃度を示して いる. MC-1 と MC-3 の地下水位は澪筋部底面を基準高とし、干出時の塩分データは除かれている. なお、懸濁粒子濃度の30日後半からのデータは欠測である.

タイドプールと低水路干潟の間の水位差が大きい期間 には干潟塩分の低下が大きく,タイドプールからの低塩 分水の流出によって塩分が低下している. 塩分が顕著に 低下しているのは地下水面の低下時に対応しており、地 下水面付近の低塩分水の存在を示している. 地中塩分が 河川水塩分よりも低い状態があることや地中塩分の鉛直 分布等から,低水路干潟内部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ていることはすでに 指摘されている⁸. 干潮前後に塩分の最小値を示すタイミ ングが流水部に近いほど早いのは上げ潮に伴って塩分供 給されるためであり、流水部に近いほど塩分の回復が早 いことを示している. 小潮期には MC-5 まで塩分低下が 及ばないが, MC-3 と MC-1 の地下水位差が約 30 cm 以上 になる大潮期には MC-5 まで塩分低下が生じており、塩 分低下の範囲は地下水位差に依存している. 写真-1 は赤 外線サーモグラフィーで撮影された捨石護岸の(a)低水路 側と(b)高水敷側での熱画像と可視画像を示している.画像から,低水護岸の低水路側の法尻には低温部分があり,低水護岸からの流出水の存在を示唆している.

(2) 干潟に供給される懸濁粒子特性

図-9(e)では粗粒分の懸濁粒子濃度は干潮付近で高く なっている. 一方、75 um 未満の細粒分の懸濁粒子濃度 は大潮期干潮時で高く, 干潟の水深が小さくなるときに 河川水中の細粒分が干潟面に接する. 粗粒分の懸濁粒子 濃度は4 ppb を超える値は水深約 200 cm 未満で発生頻度 が高くなっているが、細粒分はさらに小さい水深約20cm 未満で検出されている.同じ流れに対して粗粒分は細粒 分に比べて再懸濁しにくいことから、この粒径別の濃度 が高まる水深が異なることは干潟に供給されている懸濁 粒子の起源は細粒分と粗粒分で異なることを表わしてい る. MC-5 での水深約 200 cm は低水護岸が冠水・干出す る水深に対応している. 図-10 は図-6 に示された観測期 間に測定された水位と干潟上27 cm で測定された毎時の 流速の関係を示している。干潟上での流速は上げ潮で水 位が低水護岸の高さに相当する100 cm に最大値を示すこ とから、粗粒分の濃度上昇は流速に応じたものである. 川西ら⁹は、潮汐変動を除けば、河川水中の懸濁粒子の平

均フラックスは平水時に上流に向き、小潮期に塩水遡上 が卓越するものの、懸濁粒子濃度は潮差が大きい場合に 高いことを指摘している.図ー6の上げ潮時の水面付近の 濁水や、図-9に示された大潮干潮時に観測された高濃度 の細粒分は懸濁粒子濃度の平均フラックスの増加に寄与 している.

6. 結論

本論文で得られた結論を以下に示す.

- 1) 複断面河道の河岸に形成されたタイドプールでは地表面-20 cmの深さまで有機物、クロロフィルa、および濁質が輸送されている. 底質は細粒分が多く、塩分変化も緩慢なことから底部への表面水の浸透は遅いが、懸濁物が鉛直下向きに輸送される傾向が強い. これは、水位差による浸透が寄与するためである.
- 2) 干潟に供給されている懸濁粒子は細粒分と粗粒分で起 源が異なっている.低水路干潟上での流速は上げ潮で 水位が低水護岸の高さに相当する時間帯に最大値を示 し、粗粒分の濃度上昇は流速に対応している.一方, 上げ潮時に水面付近に浮遊した細粒分を含んだ濁質は タイドプールに供給される.
- 3)タイドプールから低水路干潟の間の水位差は干潮位に よって変化するが、大規模な出水に伴う土砂の堆積に よって透水性が低下し、干潮位に対するタイドプール の水位は高くなる.
- 4)低水路干潟における塩分低下の範囲はタイドプールと



図-10 水位と干潟上の流速の関係

の間の水位差に依存しており、流水部に近いほど塩分 の回復が早く、低水路での干潮位が低いほどタイドプ ールからの低塩分水の浸透範囲が大きくなる.

謝辞:本研究は(財)中国建設弘済会「技術開発支援制度」 の助成を受けて行われた研究の一部である.ここに記し て謝意を表する.

参考文献

- 池末弥,脇田二郎:アサリ増殖を目的とした干潟客土の研 究,有明海研究報告,第2号,pp.9-29,1955.
- 池末弥,松本直:アサリの生態学的研究—I,沈着初期アサ リの低比重並びに高温に対する抵抗力,有明海研究報告, 第3号, pp. 16-23, 1956.
- 木下秀明:アサリの卵・浮遊幼生・稚貝の高温耐性,海洋 生物研究所研究報告, No. 85204, 1985.
- 松尾豊:大海湾干潟のクロロフィル-a とフェオ色素の鉛直 分布,南西水研報, No. 20, pp. 127-136, 1986.
- 5) 日比野忠史,保光義文,福岡捷二,水野雅光: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.431-436,2006
- 6) 日比野忠史,中下慎也,花畑成志,水野雅光:河口干潟で 形成される土壤環境と底生生物の棲息要件,海岸工学論文 集,第53巻,pp.1031-1035,2006.
- 7) 中下慎也,駒井克昭,日比野忠史,池原貴一:土砂に埋没 したイソシジミの生息に関する基礎研究,海岸工学論文集, 2010.
- 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,2007.
- 川西澄,胡桃田哲也, Mahdi RAZAZ,水野雅光,福岡捷二: 太田川放水路における塩水遡上と懸濁粒子の輸送特性,水 工学論文集,第52巻, pp.1321-1326, 2008.

(2011.5.19 受付)