

ヘドロが堆積する河岸での浸透柱の敷設 による水循環の形成

FORMATION OF THE WATER CYCLE BY CONSTRUCTION OF INFILTRATION-PILLAR IN THE RIVERBANK THAT SLUDGE DEPOSITS

藤原哲宏¹・日比野忠史²・吉岡一郎³・田多一史⁴

Tetsuhiro FUJIWARA, Tadashi HIBINO, Ichiro YOSHIOKA and Kazufumi TADA

¹正会員 広島大学大学院 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 博士(工学) 広島大学大学院准教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 工修 中国電力㈱ 流通事業本部 (〒730-8701 広島県広島市中区小町4-33)

⁴正会員 工修 中電技術コンサルタント㈱ 臨海・都市部 (〒734-8510 広島県広島市南区出汐2-3-30)

The organic sediment moves with water flowing in estuary. It is carried to the river with flood tide from river mouth, and settles on the riverbed at a tidal flat. The organic sediment settled there causes the environment deterioration and loss of waterside scene value. Then, the environmental quality improvement technology was proposed using fly ash for consolidated sediment.

We established the construction technology for environmental improvement at riverbed covered by organic sediment. The infiltration-pillar was constructed as a method of supplying oxygen into consolidated sediment by the water movement in the pipe with the ebb and flood tide. Formation of the water cycle by construction of infiltration-pillar was confirmed by seepage flow analysis. After infiltration-pillar was constructed, the effect of the environmental improvement decreased the ignition loss in the sediment, and it was confirmed to decrease the nitrogen in the pore water.

Key Words : Tidal range, pore water movement, organic sediment, sediment improvement, seepage flow analysis,

1. はじめに

太田川と瀬戸内海は広島における生活と文化を繋ぐ中心的な役割を担ってきた。広島が今後、水の都として発展していくためには、治水、水辺空間の創出・利用なども含めた総合的な取り組みが必要である。1990年3月には、国土交通省・広島県・広島市の3者が協力して、一般市民が安心して河川空間を利用できるよう「水の都ひろしま」構想を策定し、水の都としてより魅力的な都市づくりを進めてきた。このような都市づくりの一環として、太田川市内派川の水辺の整備による親水性の向上が望まれており、干潟に近づきたくするような水辺空間が求められている。

太田川の市内派川に形成された干潟には、広島湾からの海水の遡上に伴って運ばれてきた有機泥が多く堆積しており、有機泥の堆積量が干潟生物等による消費量を上回るために、干潟の泥化が進行している¹⁾。干潟在来層(砂層)の上に堆積した有機泥(シルト・粘土)は、太田川デルタの地下水流動による水循環を阻害している。このため、透水性の高

い材料(石炭灰造粒物等)を用いて有機泥層内に水循環を生起させることで、干潟泥内に酸素を供給し好気的環境をつくることできれば、生物機能の回復も含めた干潟環境の改善を図ることができる。

著者らは、有機泥の堆積した河岸干潟における親水性向上技術(浸透柱、覆土)を開発し、天満川の現地実験^{2),3)}により浸透柱および覆土の効果を把握し、現在、その技術を確立するために実証試験^{4),5)}を進めている。

本研究では、広島市街地を貫流する旧太田川空鞘橋下流左岸の実証試験フィールドにおいて、2005年12月に施工した浸透柱による底質改善機構を把握するために、数値解析と現地調査を実施し、浸透柱による水循環の形成と底質改善効果について検証した。

2. 実証試験区域の概要

本実証試験は、広島市の市街地を貫流する旧太田川空鞘橋下流(キロ標 2K880~2K960)付近で実施

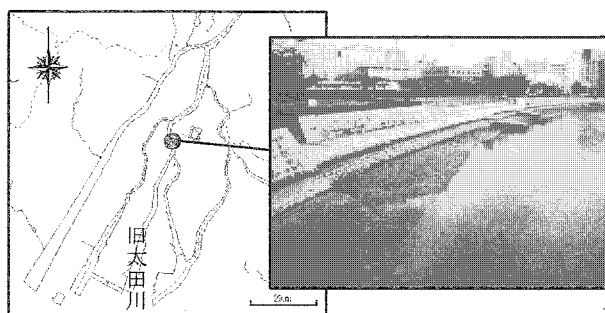


図-1 旧太田川空鞘橋付近の干潟

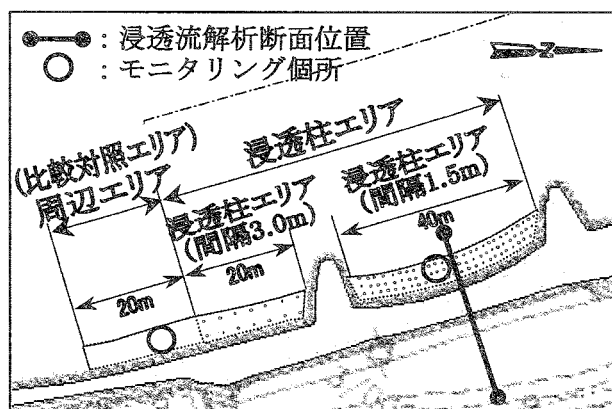


図-2 試験区域の平面図と解析・調査位置

した。旧太田川空鞘橋下流左岸の干潟の外観を図-1に示す。試験区域周辺の河岸には、河床の約2割（横断形）の干潟が形成されている。この干潟は、約0.5mの厚さで有機泥（シルト・粘土層）が堆積した泥干潟で、堆積有機泥の下には砂層が存在している。

試験区域の概要を図-2 および写真-1 に示す。実証試験は、約100m×3mの試験区域に浸透柱エリアと周辺エリアを設定し、浸透柱エリアには2005年12月に、径約0.4m、延長約0.5mの浸透柱を造成した。浸透柱エリアは、泥干潟の泥質改善効果の検証を目的としたエリアであり、浸透柱エリアには、浸透柱の間隔を1.5mにした区域（以下、浸透柱エリア（間隔1.5m）と示す）と浸透柱の間隔を3.0mにした区域（以下、浸透柱エリア（間隔3.0m）と示す）を設けた。一方、周辺エリアは、浸透柱等の未施工エリアであり、浸透柱エリアとの比較対照区域である。

当該地点の護岸構造は、高水部が練石積、小段部（T.P.+2.20m）が石張、低水部が練玉石積（被覆コンクリートに玉石を張った構造）であり、低水コンクリート基礎下には、長さ約2.7m（基礎底面下の地盤内延長約2.4m）の止水矢板が打設されている。このために、護岸法表面および泥干潟表層を通る堤内地下水と河川水の水循環は制限されている。

3. 浸透柱の性能解析（浸透柱周辺の水循環の把握）

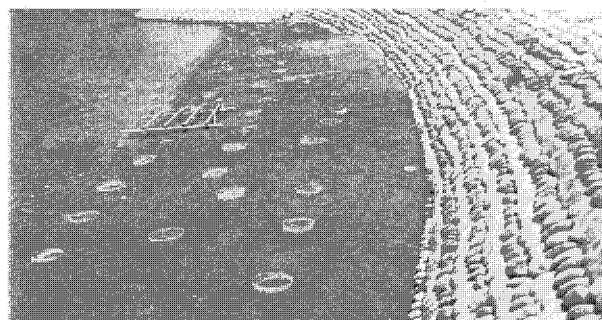


写真-1 試験区域の概況（下流側より干潟を望む）

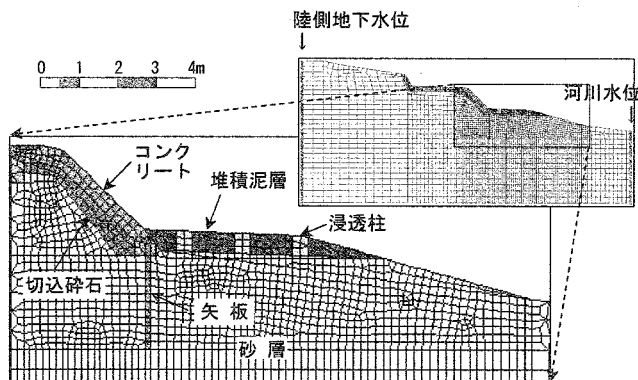


図-3 解析護岸断面の格子分割

本検討では、河川内堆積泥干潟内に透水性の高い浸透柱を設置する効果を定量的に評価するために数値シミュレーション解析を実施した。

シミュレーションでは、2次元断面による再現モデルを構築し、浸透流計算により浸透柱に流入する間隙水の地盤内での流動を把握した。

(1) 浸透流解析モデル

浸透流解析には、飽和・不飽和断面2次元浸透流解析プログラム⁶⁾を用いた。再現モデルを構築した断面位置は、図-2に示す浸透柱エリア（間隔1.5m）中央であり、護岸断面は護岸台帳より設定した。

解析護岸断面の格子分割を図-3に示す。格子幅は、浸透柱設置位置付近で約0.2mとし、浸透柱から離れるに従って格子幅が粗くなるように分割した。直径約0.4mの浸透柱は、奥行き方向に隣接する節点流速を用いて、浸透柱中央節点の流速を補正（平均値）することにより、奥行きの有限な円柱をモデル化した。

浸透物性値を表-1に示す。堆積泥層および下部砂層の透水係数は、クレガー(Creager)による D_{20} と透水係数の関係から設定した。浸透柱（石炭灰造粒物）の透水係数は港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針⁷⁾により、その他の浸透物性値は、河川堤防の構造検討の手引き等、既存資料により設定した。

陸側地下水位は、広島市中区八丁堀観測井（国土交通省太田川河川事務所内、井戸深GL.-16m）の夏季実測平均値のT.P.+0.49mとした。河川側水位は、2006年8月25日から27日の大潮期実測水位とし

表-1 浸透流解析に係る浸透物性値

物性項目	浸透物性値
透水係数(cm/s)	浸透柱 : 1.46×10^0
	堆積泥層 : 1.05×10^{-5}
	砂層 : 8.90×10^{-3}
	砕石 : 1.00×10^{-1}
	矢板 : 1.00×10^{-7}
	コンクリート : 2.00×10^{-9}
有効間隙率(%)	浸透柱 : 20
	堆積泥層 : 10
	砂層 : 20
比貯留係数(1/cm)	浸透柱 : 1.0×10^{-2}
	堆積泥層 : 1.0×10^{-1}
	砂層 : 1.0×10^{-2}
	砕石 : 1.0×10^{-2}
	矢板 : 1.0×10^{-1}
	コンクリート : 1.0×10^{-1}

た。満潮時の河川水位は護岸小段部より低く、干潮時の河川水位は堆積泥層下面より低くなる。なお、本浸透流解析では、塩分および水温の影響は考慮していない。

(2) 浸透流解析による間隙水の流動状況

浸透柱貫入前後の流速ベクトルを図-4 に示す。等水圧コンターは、堤内地下水位を基準として、100 cm毎の圧力水頭を着色で表した。河川水の循環を阻害する干潟堆積有機泥に、浸透柱を貫入することにより浸透柱下層で河川水の循環が生起することが確認された。河川水位が堤内（陸側）地下水位よりも高い時には、浸透柱内では鉛直下向きの流れが生起する。堤内地下水位と河川水位が逆転した後に浸透柱内では上向きの流れが卓越する。浸透柱内の流速が最も速いのは、満潮前 1 時間および満潮後 3 時間の水位の時である。

図-5 は、浸透柱貫入前後の差流速分布である。浸透柱の貫入によって、浸透柱内に流れが生起し、浸透柱底部の砂層に流れが伝播して、浸透柱内の流れが砂層内の流れを生起させたと考えられる。

また、矢板下部を間隙水が集中して流れるために、護岸側浸透柱直下の砂層内間隙水の移動速度が増加している。満潮前 1 時間の矢板直下の砂層内における差流速は、約 7.2×10^{-4} cm/s である。一方で、堆積泥層下部の砂層の護岸側と河川流水部側の圧力水頭差が縮小し、河川流水部側の間隙水の移動速度は減速している。

(3) 浸透柱内間隙水の流出入量の算定

数値解析結果により得られた浸透柱内の流速値から 1 時間毎の浸透柱内の流入量および流出量を算定した結果を図-6 に示す。浸透柱上端より河川水位が低い下げ潮時には下向きの流れであったものが、最干からの上げ潮に伴って上向きの流れになり、陸側地下水位より河川水位が高くなる干潮後 3 時間から再び下向きの流れになっている。また、下げ潮時

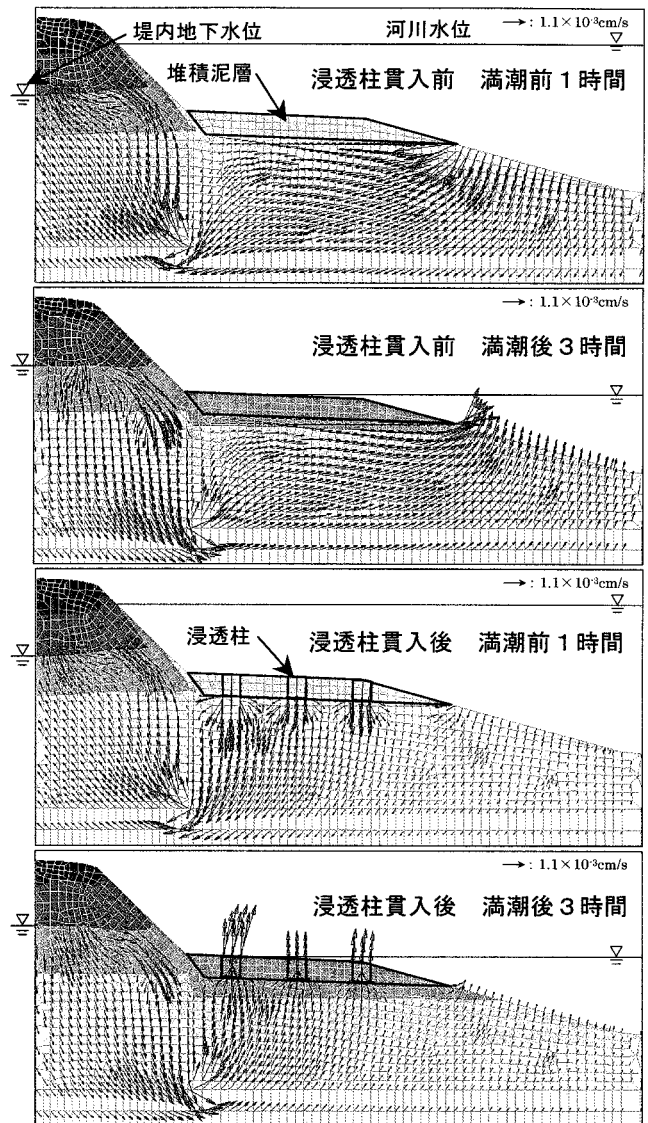


図-4 流速ベクトル図と等水圧コンター図

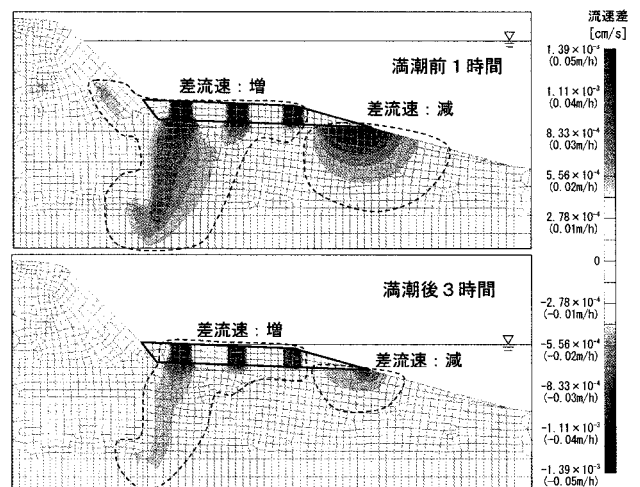


図-5 浸透柱貫入前後の差流速分布

には、陸側地下水位より河川水位が低くなる満潮後 2 時間から上向きの流れになり、河川水位が浸透柱上端より低くなる干潮前 3 時間から下向きの流れになっている。

筆者らは、2006 年の実証実験における塩分濃度

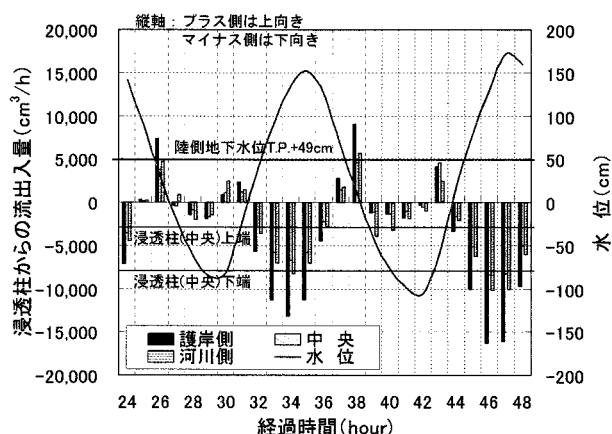


図-6 浸透柱からの流出入量（計算値）

と間隙水温の観測より、夏季の間隙水の循環は、上げ潮時に浸透柱の下端から河川水が流入し、その後、海水が浸透柱の上端から流入してくることを示しているが⁵⁾、図-6の流出入の特性と符合している。

浸透柱への流入量（下向きの流れ）は、河川水位が浸透柱上端より低い時には護岸側および中央の浸透柱と比較して、河川側浸透柱が多く、その他の流入時には護岸側浸透柱の流入量が多い。河川側浸透柱の流入量が他の浸透柱の流入量より多くなる時には、砂層から河川に間隙水が流出している。下げ潮時の浸透柱からの流出量（上向きの流れ）は、護岸側浸透柱が多い。

一潮汐の期間で流入量（下向き）が最大であったのは満潮前1時間で、水位差0.80mに対して、護岸側浸透柱の約16,299cm³/hおよび河川側浸透柱の約10,194cm³/hであった。また、河川水位が浸透柱上端より低い時の最大流入量は、河川側浸透柱の約3,939 cm³/h～3,204cm³/hである。流出量（上向き）の最大は満潮後3時間で、水位差0.38mに対して、護岸側浸透柱の約9,078cm³/hおよび河川側浸透柱の約5,654cm³/hであった。

直径40cmの浸透柱の高さ1cm当たり間隙水量は、有効間隙率を20%と仮定すると、約251cm³となる。高さ50cmの浸透柱全体では、約12,570cm³である。

この間隙水量と流速値から求めた河川側浸透柱の流出入量を比較すると、陸側地下水位より河川水位が高い5時間の間の流入水量は、浸透柱内間隙水量の228%～276%である。一方で、下げ潮時の流出量は約5,654cm³/hであり、下げ潮時の総流出量は、浸透柱内の間隙水の46%～59%である。この浸透柱の流出入水量の差は、干潟前面砂層から河川内への流出により均衡が保たれていると考えられる。

以上のことから、干潟下部砂層の間隙水は、浸透柱から流入し、干潟前面の砂層露出部から河川に流出する流動であると想定できる。この流動の変化は、流入量が最大となる満潮前1時間の差流速分布（図-5）において、干潟の河川流水部側端部付近砂層の間隙水移動速度が顕著に低下している状況とも符合する。

また、河川水位が浸透柱上端より低い下げ潮時における流入量は、約3,939 cm³/h～3,204cm³/h（水

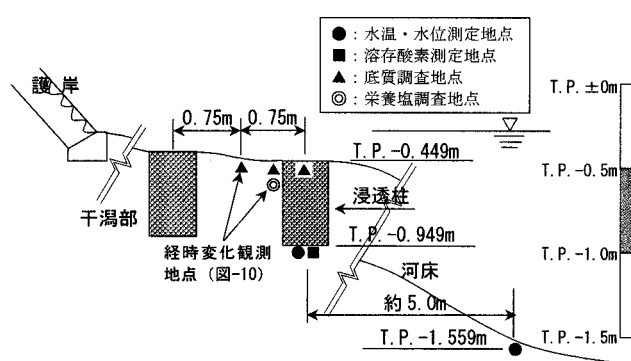


図-7 各計測機器の設置状況

表-2 現地調査項目

対象エリア	調査項目
浸透柱エリア (間隔1.5m)	[間隙水質] 水温, 水位, DO, NH ₄ -N, NO ₃ -N, NO ₂ -N, PO ₄ -P [底質] 粒度分布, 強熱減量, 硫化物, POC, PON, POP, ORP
周辺エリア	[間隙水質] NH ₄ -N, NO ₃ -N, NO ₂ -N, PO ₄ -P [底質] 粒度分布, 強熱減量, 硫化物, POC, PON, POP, ORP

位低下速度は15.7 cm/h～12.8 cm/h)であり、河川水位が浸透柱下端より低くなる大潮期には、浸透柱上端から40cm（高さの80%）が干出する。

4. 間隙水、底質・水質の現地調査

浸透柱敷設による間隙水の循環特性、有機泥処理および栄養塩の削減効果を物理量的に評価するために、現地調査を実施した。計測機器の設置および試料採取等位置は図-7に示すとおりであり、水温・水位計測にはCOMPACT-TDをDO計測にはCOMPACT-DOWを用いた。また、調査項目は表-2に示すとおりである。

(1) 浸透柱底面における水温およびDOの変動

浸透柱周辺の水循環を把握するために、浸透柱下端に水温・水位計およびDO計を設置し、2007年9月10日から10月12日の間、浸透柱内のDO、浸透柱内および河川流水部の水位、水温の変動を計測した。浸透柱底面と河川流水部における水位・水温および浸透柱底面のDOの変動を図-8および図-9（抜粋）に示す。夏季の浸透柱底面における間隙水は、水位の変動に伴って水温およびDOが変化している。

浸透柱底面で観測される水位（水圧値）は、河川水位が浸透柱上端高より低い下げ潮時には河川水位に対して数cm～20cmの水位差での低下が観測（図-9①から②）されている。浸透柱内水位と河川水位の水位差は、河川水位と堤内地下水位の差により浸透柱底面での圧力水頭位が河川水位より高いことや浸透柱底面下の砂層の透水性によるものと考えられる。

河川水位が浸透柱上端高より低い下げ潮時にお

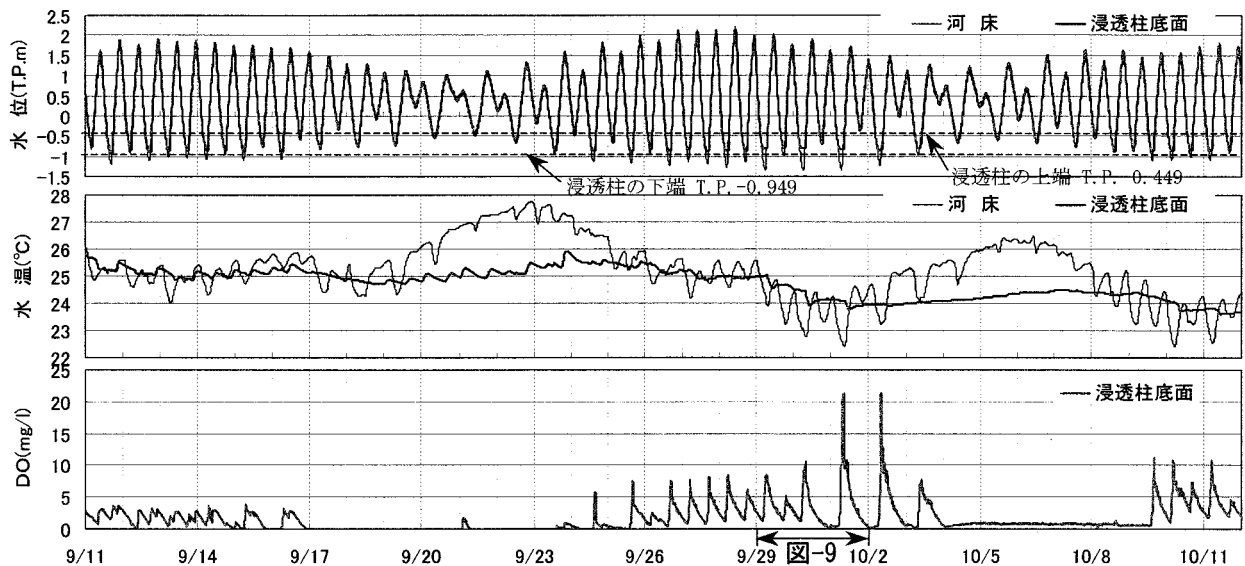


図-8 河川水位の変化に伴う浸透柱内の水位および下端での水温・DOの変動特性 (2007/9/10～10/12)

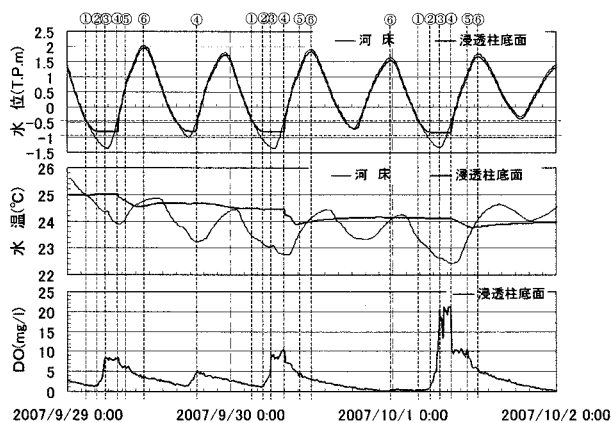


図-9 河川水位の変化に伴う浸透柱内の水位および下端での水温・DOの変動特性 (抜粋：2007/9)

る浸透柱底面での観測水位の低下速度は、30 cm/h～6 cm/h (10 分毎の観測値) であり、浸透流解析による水位低下速度 (15.7 cm/h～12.8 cm/h, 1 時間毎の計算値) と一致しており、浸透流解析モデルの再現性を評価できる。

浸透柱底面の間隙水温は、24℃～26℃の範囲で変動しており、水位および河川水温の変動に伴う間隙水温の変化が確認された。大潮期の河川水温は、満潮の約 2 時間後に最高値、干潮の 2～3 時間後に最低値が観測され、浸透柱底面の間隙水温は河川水温より日変動が少なく、河川水温の平均的な水温である。小潮期には、小潮から数日後に最大となる河川水温の上昇があり、浸透柱底面間隙水温に比較して最大で約 4℃の水温差が生じていることから河川水が浸透柱底面までは流入していないと考えられる。

浸透柱底面間隙水温の明確な変動は、水位上昇時に浸透柱上部から河川水が流入する時 (図-9 ④) や満潮前後に浸透柱内の流れが鉛直下向きの時に河川水温との差が縮小する水温変化がある (9/11～9/17 の大潮期および図-9 の⑥前後)。

DO は、河川水位の上下動に伴い、0～20 mg/l の

範囲で変動しており、河川水位が浸透柱底面より低くなる大潮期の干潮時 (図-9 ③) および水位上昇時に浸透柱上部から河川水が流れ込む時 (図-9 ④) や満潮前後に浸透柱内の流れが鉛直下向きの時 (図-9 ⑤) に DO が上昇または変動する傾向にある。また、小潮期には DO が上昇していないが、これは水温の変化と同様に浸透柱底面に DO を含んだ河川水が流入していないためと考えられる。

図-9 に示す期間の浸透柱底面の DO 変化は、浸透柱底面が干出した後に DO が上昇しており、浸透柱底層の一部干出により大気中の酸素の供給があったものと考えられる。その後、水温変化が 1℃未満の状況下で、水位の上昇とともに DO が徐々に低下し、満潮時には DO が 3mg/l 程度の準好気過程にある。また、水位が浸透柱上端付近まで低下した時には、DO が 2mg/l 以下の嫌氣的過程になっており、一潮汐の間に DO の供給と消費が繰り返されている。

好氣的過程では有機態窒素が酸化的に分解・無機化され、無機態窒素として NH_4^+ が放出され、準好気過程では NH_4^+ が NO_2^- および NO_3^- に硝化され、嫌氣的過程では N_2 を排出し脱窒が起こっていると考えられる。

(2) 間隙水質・底質の経年的な改善効果

2005 年 12 月の浸透柱敷設前の 2005 年 9 月および浸透柱施工後、11 ヶ月 (2006 年 10 月) ならびに 22 ヶ月 (2007 年 9 月) の間隙水質・底質調査結果 (代表地点の表層 10 cm 程度で測定) を図-10 に示す。施工後約 2 年が経過した時点において、ORP が両エリアで酸化状態に転換し、底質が改善されつつあることがわかる。強熱減量は、浸透柱エリア (浸透柱間隔 1.5m 地区、浸透柱間中央部) において若干の減少が見られることから僅かながら有機泥処理が進んでいると考えられる。一方、周辺エリア (比較対照エリア) では横這いから若干の増加傾向にあ

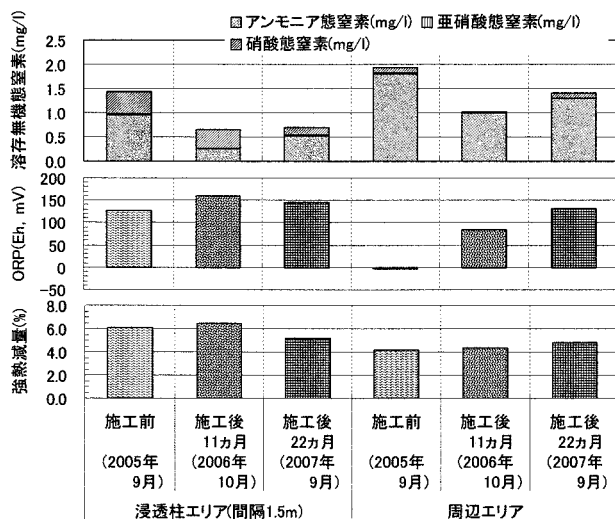


図-10 間隙水質・底質の経時変化

った。

浸透柱エリア（浸透柱側面部）の溶存無機態窒素（アンモニア態＋硝酸態＋亜硝酸態窒素）は、施工前の約 50%に減少し安定しているが、周辺エリアでは、22 ヶ月後に増加の傾向を示している。

(3) 浸透柱周辺の改善効果の広がり

浸透柱内、浸透柱側面、浸透柱から 0.75m（隣接浸透柱間中央部）および周辺エリアで 2007 年 9 月 10 日に実施した底質調査結果（代表地点の表層 10 cm程度で測定）を図-11 に示す。浸透柱内に混入した浮遊有機泥には、細泥（シルト・粘土）分が 14.9%含有していた。干潟現地盤には 50%程度の細泥分が含まれており、浸透柱内に細泥分が残留し難いことが考えられる。浸透柱内に混入した泥の強熱減量は 3.0%，粒子性有機態炭素（POC）は 7.0mg/g，粒子性有機態磷（POP）は 0.2mg/g であり、干潟堆積泥と比較し、砂粒子分が多く、有機分が少ないことがわかる。このことが、施工 22 ヶ月後においても浸透柱内の透水性が確保されている原因であると考えられる。

還元性の指標である ORP 値は、浸透柱内の堆積泥で最も高く、浸透柱から離れるにしたがって低下する傾向にあるが、その他の指標では浸透柱からの距離による差異を見出せない。浸透柱に流入する水循環により酸素が供給され、周辺地盤の ORP は改善されているが、有機物処理は主に浸透柱内で行われ、周辺地盤への改善効果の広がりを定量化するためには調査項目の追加と時間経過を要すると考えられる。

5. おわりに

本実証試験では、数値解析と現地調査を実施し、浸透柱による水循環の形成と底質改善効果について検証した。浸透柱間隔の評価および干潟堆積泥全体の改善効果については、現在、複数モデルの浸透流

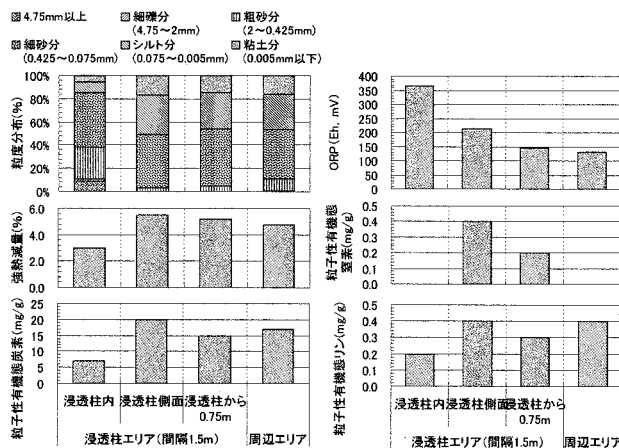


図-11 底質調査結果（施工後22ヶ月）
（調査実施日：2007年9月10日）

解析と底生生物を含めた継続調査を進めている。

(1) 浸透柱敷設による水循環の形成

干潟堆積泥（ヘドロ）を貫入する浸透柱を敷設することにより河川水の水循環が生起することが確認された。浸透流解析により計算された流況から、実測された河川水位の変動に伴う塩分および水温の変化を説明できることが確認された。

(2) 浸透柱周辺の底質改善効果

浸透柱を敷設することによって、周辺地盤内（10cm 程度での測定結果）での還元状態の改善、これに伴う有機物量および溶存無機態窒素の減少があり、浸透柱周辺での底質の改善が進行していることが確認された。

参考文献

- 1) 日比野忠史：河口域での有機物の循環と生物生息場の形成，水系環境の保全と創造-自然再生に向けて-講演集，pp. 2-2-1～2-2-12，2004。
- 2) 富田智，日比野忠史，末國光彦，田多一史，水野雅光：石炭灰造粒物を用いた底質改善技術の検討，海洋開発論文集，pp. 743～748，2005。
- 3) 日比野忠史，末國光彦，田多一史，富田智，水野雅光：鉛直浸透を生起させた堆積泥内での DO 変動特性（石炭灰による底質浄化），年次学術講演会概要集，pp. 469～470，2005。
- 4) 日比野忠史，末國光彦，山田恭平，田多一史，富田智，水野雅光：有機泥の堆積した河岸の親水性向上のための施工技術の検証，海洋開発論文集，pp. 939～944，2006。
- 5) 藤原哲宏，日比野忠史，末國光彦，末次弘道，富田智，水野雅光：浸透柱による水循環の形成と底質改善効果の把握，海洋開発論文集，pp. 1135～1140，2007。
- 6) 岡山地下水研究会：プログラム名 Dtransu-2D，http://gw.civil.okayama-u.ac.jp/gel_home/
- 7) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針，pp. 2-79，2004.，<http://www.mlit.go.jp/kowan/recycle/0/01.pdf>