石炭灰造粒物層内における 地下水流動と濁質の輸送

中下 慎也¹・中本 健二²・中澤 泉³・福嶋 正博⁴・日比野 忠史⁵

¹正会員 広島大学助教 大学院工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
E-mail: nakashita@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 中国電力(株) エネルギー総合研究所 (〒739-0046 広島県東広島市鏡山3-9-1)

³いであ(株) 大阪支社 (〒559-8519 大阪市住之江区南港北1-24-22)

⁴いであ(株) 中国支店 (〒730-0841 広島県広島市中区舟入町6-5)

⁵正会員 広島大学准教授 大学院工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
E-mail: hibinot@hiroshima-u.ac.jp

広島デルタの河口域の河川干潟では生活排水の増加によりヘドロ化が進み、アナジャコ等が優占する泥干潟が形成されている。泥化が進み、かつ護岸堤内側との地下水流動が遮断された河川干潟の底質環境改善を図るため、2011年には石炭灰造粒物を用いた透水層が設置された。本研究では石炭灰造粒物層内における地下水流動性を把握するために、施工から2年後の2013年から2014年にかけて造粒物層内の流動性、地下水の性状の測定、地下水の連続測定を実施した。石炭灰造粒物層内では施工から2年後においても十分に地下水の流動が生じており、地下水流動に伴って酸素を含む地下水とクロロフィルaを含む濁質が造粒物層内へ輸送されていることが明らかとなった。

Key Words : Groundwater, tidal flat, granulated coal ash, suspended substance

1. 序論

広島デルタを流れる太田川の市内派川河口域の河川干潟では生活排水の増加によりヘドロ化が進み、アナジャコ等が優占する泥干潟が広範囲に形成されている。また、漁獲量が低下したアサリ漁場再生のために種苗放流が継続されているが、その効果も小さく、アサリの生産は期待できない状況にある。広島デルタでは不透水層がTP-10~30m付近にあり¹⁾、河川護岸の耐震化にあたり、護岸の河川側法尻や堤内側法尻に不透水層まで達する鋼矢板が打設されている。不透水層まで達する鋼矢板の打設によって護岸堤内地と干潟間での地下水循環が阻害されることが示唆されており²⁾、地下水循環が阻害されることが予想される。また、太田川に形成されている干潟に生息する二枚貝の生息環境を形成する重要な要因の一つに地下水流れがあることが示されており³⁾、地下水循環の阻害がアサリの生産低下の一因として考えられる。

2011年には泥化が進み、かつ護岸堤内地側との地下水流動が阻害された河川干潟におけるアサリ育成技術構築の試みとして、透水性が高く、造粒物からCaO等が溶出するアルカリ剤としての効果も期待できる⁴⁾石炭灰造粒物を用いた透水層が設置された。さらに、2012年には干潟の底質環境改善機能の検証を目的とした現地実証試験

とモニタリング調査が実施され、施工後12ヶ月後の結果が報告されている⁵⁾。その結果、造粒物の散布により地下水の流動性の改善、底質の強熱減量の減少、酸化還元電位の改善が確認されている。

本研究では施工から2年後の2013年から2014年にかけて底質、地下水質の現地調査を行い、石炭灰造粒物層内における地下水の流動を明らかにし、石炭灰造粒物散布による改善効果の持続性や二枚貝の生育場としての適性について検討した。

2. 石炭灰造粒物層内に形成される環境

(1) 調査地点と現地調査の概要

図-1に調査を実施した太田川市内派川の吉島地区、図-2には吉島地区における石炭灰造粒物の散布状況と調査地点を示す。調査地点の特徴として、造粒物区1は造粒物が非常に多く、40 cm程度の層厚がある。造粒物の間隙は砂泥だが、やや締まっており、砂が比較的多い。造粒物区2は造粒物が多く、30 cm程度の層厚があり、造粒物の間隙は砂泥である。対照区は造粒物の散布が無い地点で造粒物区1の近くに設定した。対照区の底質は砂泥だが、泥分が多い。

図-1 調査地点

図-2 石炭灰造粒物の散布状況

河川干潟に施工した造粒物層内の地下水質，地下水の流動を把握するために，造粒物区と对照区における流動性，地下水の性状，造粒物層内における地下水の連続測定を実施した．地下水の流動は造粒物層内と对照区の地下水位の変化を連続的に測定することで地下水の動きの有無を地下水流動性として検討し，造粒物層内の地下水の性状は塩分，水温，クロロフィル a 濃度，濁度，pH，ORP を多項目水質計（AAQ-1183，JFE アドバンテック社製）などを用いて測定した．

(2) 造粒物散布地点と对照区での地下水性状

図-3 には 2013 年 11 月 22 日に測定した造粒物区と对照区の深度毎に測定した地下水の pH～ORP 関係，図-4 には造粒物区 2 における地下水質の鉛直プロファイルが示されている．

对照区では pH が 7.7～7.8，造粒物区では pH が 7.9～8.15 と造粒物区で pH が 0.2 程度高い．これは，石炭灰造粒物の効果の 1 つである CaO の溶出に伴って OH⁻ が生成されたことによるものである．また，地盤下になるほど ORP は低下する傾向にあり，その低下量は pH の上昇による低下分よりも大きい．特に，造粒物区 2 では地盤下 35 cm 程度から泥層が確認されており，石炭灰造粒物層

図-3 造粒物区と对照区の深度毎に測定した地下水の pH～ORP 関係

図-4 造粒物区 2 における地下水質の鉛直プロファイル

よりも下の泥層まで達すると ORP は地盤下 40 cm で -100 mV，地盤下 50 cm で -250 mV と急激に低下し，還元的な状態が形成されていることがわかる．

図-4 より，地盤下 35 cm で泥層が出現するとともに地下水の水温が上昇し，DO が低下する傾向にあり，石炭灰造粒物層と泥層では異なる水環境が形成されていることがわかる．

(3) 造粒物層内の地下水性状の連続測定

造粒物層内の地下水性状を連続測定し，流動性を測定することを目的として，造粒物区 1 と 2 の地盤下 20 cm，25 cm に流向・流速計（Comact-EM 計，JFE アドバンテック社製）を設置した．測器はφ 125 mm のメッシュ（φ

図-5 造粒物区における(a)河川水位、(b)造粒物層内の地下水と河川水の水温の経時変化

2 mm 程度) 入りの塩ビパイプに入れ、地下水を 10 分間隔で連続測定した。同時に河川に水位・水温計 (Compact-TD 計, JFE アドバンテック社製) を設置し、河川水の水位、水温を連続測定した。石炭灰造粒物層内で生じている地下水流動は機器の精度 (1 cm/s) よりも小さかったため、地下水流向・流速については考察することができなかった。そのため、地下水の水温変動のみを用いて地下水の流動性を検討した。

図-5 には造粒物区における(a)河川水位、(b)造粒物層内の地下水と河川水の水温の経時変化が示されている。地下水温は上げ潮開始直後に低下しており、上げ潮の干潟冠水時に低水温の河川水が地盤内に活発に浸透していることがわかる。水温の変動が造粒物区 1 と 2 で異なるのは両地点の機器の設置高さが異なるため (造粒物区 1: 地盤下 20 cm, 造粒物区 2: 地盤下 25 cm) であると考えられる。

以上のことから石炭灰造粒物層内においては地下水の流動が活発に生じていることがわかった。

(4) 石炭灰造粒物層、対照区における地下水位変動

図-6 には大潮期における(a)河川水位と(b)造粒物区 1、対照区における地下水位変化が示されている。石炭灰造粒物区 1 の地盤高は T.P. -0.76 m, 泥干潟区の地盤高は T.P. -0.95 m であった。地下水位は造粒物区 1、対照区それぞれに $\phi 250$ mm の塩ビパイプを 20 cm 程度埋め、パイプ内に出現する地下水位の経時変化を測定した。

造粒物区においては河川水位が地盤高よりも低い期間に 5 cm 以上地下水位が低下したのに対し、泥干潟である対照区においては地下水位の低下は生じていないことがわかる。造粒物層内における地下水位の低下は下げ潮時に透水性の高い石炭灰造粒物層の地下水位と河川水位の水位差が生じることによって生じている。

泥干潟が形成されている太田川市内派川の空鞆地区では地下水の流動性が低く、河川水との水位差が生じた場合においても地下水位が低下しない現象が確認されてお

図-6 大潮期における(a)河川水位と(b)造粒物区 1、対照区における地下水位変化

図-7 河川水位と石炭灰造粒物層内の地下水位変動

り⁶⁾、吉島地区においても底質改善前の泥干潟では地下水位の低下が生じるような環境ではなかったことが予想される。

図-7 には 2014 年 5 月 29 日に石炭灰造粒物地盤内、河川に水温・水位計 (Compact-TD 計) をそれぞれ設置して測定された地下水位と河川水位の経時変化が示されている。地下水位測定地点の地盤高は T.P. -0.88 m 程度であり、図中に実線で示されている。また、機器は地盤下 20 cm 程度に埋設した。

地下水位は河川水位が地盤高まで低下した後から水位の低下勾配が急激に変化する。この期間は干潟が干出しており、図-6 で示されている地下水位の変動と一致する。

石炭灰造粒物区における地下水位は河川水位が地盤高よりも低くなったときに確認され、地下水位と河川水位の間に水位差が生じるタイミングは調査期間中ほぼ一定であった。また、干出時間は潮汐に依存し、大潮期には干出時間は長くなる。干出時間の増加に伴い地下水位低下量も増加しており、石炭灰造粒物区においては干出期間に地下水位が低下し続けていることがわかる。

(5) 潮位変動に伴う石炭灰造粒物層内の地下水質変動

図-8には石炭灰造粒物の地盤下 10 cm, 20 cm, 30 cm における(a)河川水位, (b)地下水位, (c)塩分, (d)水温, (e)DO 濃度の経時変化が示されている。地下水質は、造粒物区 1 に $\phi 250$ mm の塩ビパイプ 3 本をそれぞれ 10 cm, 20 cm, 30 cm の深さまで並べて挿入し、パイプ内の泥と石炭灰造粒物を除去し、塩ビパイプの底面から湧出する地下水を多項目水質計を用いて測定した。なお、地盤下 30 cm においても塩ビパイプの底面は泥層まで達しておらず、石炭灰造粒物層からの地下水を測定している。

石炭灰造粒物層内の地下水はどの深さにおいても同様の低下速度であり、下げ潮時の 100 分間で 5~6 cm 低下した。17 時 15 分の結果は河川水位が地盤高と等しくなる直前の測定結果であり、河川水位の上昇に伴って石炭灰造粒物内の地下水位が上昇し始めていることがわかる。地下水質は地盤下 10 cm と 20 cm, 30 cm では大きく異なり、地盤下 10 cm の塩分は低く、水温、pH、DO 濃度は高い。地盤下 10 cm の水質は同時に測定した河川水表面層の水質に近いことから、河川水の影響を受けた地下水であることが予想される。一方で地盤下 20 cm 以深の地下水は起源が河川表層水とは異なる石炭灰造粒物層内を流れる地下水と考えられ、水温は地盤下 10 cm と比較して 2 度程度低く、塩分は 2~3 psu 程度高い。しかしながら、DO 濃度は 5 mg/L 程度存在している。

これらの結果から、石炭灰造粒物層内では地下水流動が活発に生じており、地下水位も地盤下 10 cm 程度まで低下していることがわかる。対照区では地下水位が低下せず、石炭灰造粒物層内では地下水位が低下すること、地下水の DO 濃度が高い状態で保たれていることから、施工後 2 年が経過しても地下水流動性が高い場が維持されていることがわかった。

3. 石炭灰造粒物層内での濁質の輸送

石炭灰造粒物層内においては現地の泥干潟と比較して地下水の流動性が高く、干出時に地下水位が低下すること、地下水流動に伴う水温変動や DO 濃度が高い状態で維持されていることが確認された。石炭灰造粒物層内においては地下水流動に伴い濁質が堆積していることが

図-8 石炭灰造粒物層内の各深さにおける(a)河川水位, (b)地下水位, (c)塩分, (d)水温, (e)DO 濃度の経時変化

図-9 下げ潮時、上げ潮時における河川水と造粒物層内地下水のクロロフィル a, フェオフィチン濃度

現地調査から明らかとなっており、この石炭灰造粒物内を流動する濁質が底生生物の餌料として利用できるのであれば、底生生物（アサリなど）の良好な生息場が形成されている可能性がある。本章では、石炭灰造粒物層内を流動する濁質に着目し、濁質の組成や時間的な濃度変化について検討する。

(1) 調査の概要

地下水、河川水に含まれる濁質の組成を明らかにするため、2014年9月9日に河川水位が地盤高よりも低くなった期間（下げ潮時）と、その後河川水位が地盤高付近まで上昇した期間（上げ潮時）に河川水と造粒物区1の層内の地下水を採取し、クロロフィルaとフェオフィチン濃度を測定した。また、造粒物層内での濁質の移動、DO濃度の経時変化を明らかにするため、造粒物層内の地下水の連続測定を実施した。造粒物層内の地下水の連続測定には造粒物層内に3mmのメッシュで覆ったカゴ（16cm×26cm×12cm）を設置し、その中に塩分・水温計（Compact-CT計）、溶存酸素計（DOW計）、濁度計（CLW計、以上JFEアドバンテック社製）を設置し、2014年9月10日～10月7日まで10分間隔で地下水の連続測定を実施した。塩分と水温については河川水も併せて調査した。地下水の測定において、各機器は測定部を上に向けて測定を行った。調査後には造粒物層内に設置したカゴ内の堆積泥（造粒物層内を流動する濁質が堆積したもの）と造粒物区表層の堆積泥を採取し、75μmのふるいで分けることで細粒分含有率と燃焼特性（300℃、375℃、500℃、600℃の強熱減量）を測定した。

(2) 造粒物層内の濁質性状と潮汐に伴う変動

図-9には下げ潮時、上げ潮時における河川水と造粒物層内間隙水のクロロフィルa、フェオフィチン濃度、図-10には観測期間中の(a)河川水位、河川水と間隙水の(b)塩分、(c)水温、間隙水の(d)クロロフィルa、濁度、(e)DO

図-10 大潮期における(a)河川水位と造粒物層内と河川水の(b)塩分、(c)水温、(d)クロロフィルa、濁度、(e)DO濃度の変化(点線期間は造粒物区の干潟が干出したことを表す)

図-11 造粒物区2の表層と層内に堆積する泥の(a)細粒分含有率、(b)燃焼特性

濃度の経時変化が示されている。

クロロフィル a は二枚貝の餌料となるが、造粒物層内には河川水と同程度の濃度でクロロフィル a が存在していること (図-9)、造粒物層内の間隙水性状は干潟が干出するタイミングで大きく変化しており (図-10)、地下水位の低下に伴って表層河川水が浸透していることが予想される。二枚貝の生育環境として重要なクロロフィル a は概ね $2\sim 6\mu\text{g/L}$ で河川水のクロロフィル a と同程度の濃度で長期的に維持されており、DO 濃度は $2\sim 8\text{ mg/L}$ の範囲で変動しており、貧酸素状態が継続することはなかった。

(3) 造粒物層内を流動する濁質の性状

図-11 には造粒物区 2 の表層と層内に堆積する泥の(a)細粒分含有率、(b)燃焼特性が示されている。

造粒物層内を流動する濁質は表層に堆積する泥よりも細粒分含有率、有機物量 (IL_{600}) が高いことがわかる。 $75\mu\text{m}$ のふるいでふるい分けした試料では表層泥と層内の濁質の燃焼特性は同程度であることから、表層泥は造粒物層内へ輸送される際に有機物量を多く含む細かい粒径の濁質に選別されて輸送されていることが予想される。

4. 結論

本研究では施工から2年が経過した造粒物層内の地下水流動性を明らかにし、石炭灰造粒物散布による改善効果の持続性や有用二枚貝の生育場としての適性について検討した。以下に本研究で得られた知見についてまとめる。

- (1) 透水層としての機能を期待して施工された石炭灰造粒物層内では施工から2年後においても十分に地下水流動が生じており、透水層としての効果が持続していることが明らかとなった。
- (2) 造粒物層内では潮汐変動に伴う地下水位変動が生じていることから、地下水流動が活発に生じ、地下水流動に伴って酸素を含む地下水とクロロフィル a を含む濁質が造粒物層内へ輸送されていることが明らかとなった。
- (3) 造粒物層内では地下水流動に伴いクロロフィル a は $2\sim 6\mu\text{g/L}$ 、溶存酸素濃度は $2\sim 8\text{ mg/L}$ で河川水と同程度に維持されており、二枚貝の生息に良好な水環境が形成されていることが予想される。

参考文献

- 1) 中下慎也, 中岡孝行, 三上育英, 清家泰, 日比野忠史: 河川感潮域における不圧地下水と干潟地下水との水循環, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, pp.1216-1220, 2013.
- 2) 中下慎也, 駒井克昭, 日比野忠史, 福岡捷二, 阿部徹: 地下構造が河川干潟の地下水・底質環境に及ぼす影響, 河川技術論文集, 第 16 巻, pp.185-190, 2010.
- 3) 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, pp.1086-1090, 2010.
- 4) 藤原哲宏, 日比野忠史, 吉岡一郎, 田多一史: 砂層河岸に堆積した有機泥の浄化技術の評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 69, pp.1405-1410, 2013.
- 5) 藤原哲宏, 中本健二, 日比野忠史, 齊藤直: 地下水が遮断された河口干潟でのアサリ育成場の構築, 土木学会論文集 B2 (海洋開発), Vol. 69, pp.1024-1029, 2013.
- 6) 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, 第 23 巻, pp.1135-1140, 2007.

GROUNDWATER FLOW AND TRANSPORTATION OF SUSPENDED SUBSTANCE IN GRANULATED COAL ASH LAYER

Shinya NAKASHITA, Kenji NAKAMOTO, Izumi NAKAZAWA,
Masahiro FUKUSHIMA and Tadashi HIBINO

Increase of sludge sedimentation caused muddy condition of tidal flat in the Ota River estuary. To improve the sediment condition and make a habitat for short-necked clam, granulated coal ash (GCA) layer was built as permeable layer in tidal flat in 2011. In this study, groundwater flow and groundwater quality in GCA layer were measured to understand the groundwater flow after 2 years from GCA layer construction. Groundwater fluidity was investigated from continuous measurement of groundwater level in GCA layer.

Groundwater fluidity in GCA layer was kept high after 2 years from GCA layer construction. Moreover, it was understood that chlorophyll-a, oxygen, and suspended substance were transported due to the groundwater flow.