石炭灰造粒物の海底被覆による 海域環境の改善効果

A STUDY OF MARINE ENVIRONMENTAL IMPROVEMENT THROUGH COVERING ON SEABED WITH FLY ASH BEANS

井上省吾¹・西野博史¹・木村道夫¹・日比野忠史²・首藤啓³

Shogo INOUE, Hiroshi NISHINO, Michio KIMURA,
Tadashi HIBINO and Akira SUTO

¹国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所（〒730-0029 広島市中区三川町2-10）

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

³正会員 工修 （財）港湾空間高度化環境研究センター（〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目1-10）

A prototype model experiment was conducted to verify the effectiveness of covering the seabed with fly ash beans to improve the environment in marine areas contaminated by organic sludge buildup. The site of the experiment was Kaita Bay, located in the innermost region of the Hiroshima Bay in Japan. Three different thicknesses of the covering layer were tried in three separate areas. Over approximately six months, the site was monitored, and the degree of improvement is assessed based on monitoring data. Data was gathered on water quality, sediment, interstitial space of beans, and benthos.

It was found that fly ash beans contributes positively to the improvement of the marine environment, as it is effective at suppressing suspended mud. This material is a likely contributor to sludge breakdown, and alters the environment in a manner favorable to habitation of benthos by decreasing hydrogen sulfide concentration and otherwise improving water quality.

Key Words : Fly ash beans , sediment, water quality, prototype model, improvement technique

1. はじめに

東京湾、伊勢湾、瀬戸内海などの閉鎖性海域では、富栄養化とそれに伴う赤潮、貧酸素水塊などの問題に対応するため、陸域から流入する COD、リン、窒素の負荷削減対策が行われており、赤潮発生に伴う漁業被害の減少など一定の効果が現れている。しかし、一部の海域では依然として貧酸素水塊の発生などが見られており、第6次水質総量規制においては、対策の方向性として、陸域負荷の削減だけではなく、底泥からの栄養塩類の溶出を抑制するための底泥の除去や覆砂などの底質改善対策の必要性が述べられている¹⁾。

広島湾の奥部に位置する海田湾は、ヘドロの堆積が著しく進行し、広島湾の中でも最も汚濁した場所であり、夏季の貧酸素化等の問題が生じている海域である。平成19年3月に策定された広島湾再生計画²⁾では、海田湾がアピールエリアの一つとして選定され、親水などの利用に適した水環境を再生する取り組みが求められている。

一般的に海域環境の改善方策として、陸域からの

負荷低減、干潟造成や藻場造成といった自然再生、底泥の浚渫、覆砂などの各種取り組みが実施されている。海田湾の現況であるヘドロの堆積がもたらす影響を効果的に改善する手法として、石炭灰造粒物の海底被覆の方法が提案されている^{3), 4), 5)}。

石炭灰造粒物は、比重が軽くヘドロへの沈み込みを軽減でき、造粒物自体の吸着効果、浮泥の舞い上がり抑制効果などが期待されている。また、有機物の分解についても造粒物間の空隙を確保でき適正な環境を形成することで促進ができると考えられる。

本研究は、このような石炭灰造粒物のもつ特性を活用し、海域環境を改善する方法の効果について、現地実証試験による評価を行った。実証試験の施工後約半年が経過した時点で、ここまでの調査結果について整理し、開始前と比較・分析を行った。

2. 現地実証試験の概要

(1) 実証試験の実施場所

石炭灰造粒物の海底被覆による海域環境改善効果を検証するために、平成21年5月より約2ヶ月の

期間で試験区の施工を行った。場所は、**図-1** に示す海田湾の最奥部で坂なぎさ公園前の堀込み状の海域で、幅 190m、長さ 315m の範囲で 6ha を 3 分割して、異なった条件にて試験区を設けている。

図-1 実証試験区画の位置

(2) 試験区の構造

海域改善効果に対して、石炭灰造粒物の被覆厚さが大きな要素と考えられるため、3 区画は厚さを 5cm、10cm、および 20cm として施工した。**図-2** は、試験区の縦断方向の断面図を模式的に示している。これら試験区の違いによって、特に海域環境改善効果の持続期間が比較できるものと考えられる。

図-2 実証試験区画の設計構想

3. モニタリング調査結果

(1) 調査項目

実証実験の海域環境改善効果を把握するために、主とした着眼点は次の 3 つである。

水・底質の改善効果：水質及び底質の D0、ORP などの項目の変化

底生生物への効果：生物量の変化、生息場の状態

被覆層の有機物捕捉・分解、浮泥の移動抑制効果

効果：被覆層内での物理・化学的な性状変化など

これらの改善効果を把握するために、被覆層内、水中部、底質、生物調査などの調査を実施した。

図-3 現地調査地点

(2) 調査位置・時期

図-3 に各調査の測点を示す。また、**表-1** に施工後、主に夏季と冬季に行った調査項目と測点の関係を示す。なお、試験区 St 1～3 については各試験区を 3 分割した中央点に測点を設け、各試験区の両側にも測点を設定して、枝番で表記している。

表-1 モニタリング調査項目

項目	試験区			境界	対照区			周辺		
	1	2	3	5	4	6	7	8	9	10
被覆層調査										
沈降物調査										
濁度詳細										
底質調査										
水質調査										
連続（水質・流動）										
底生生物										

(3) 調査結果

実証実験を進めるにあたって、試験区の施工前から各種調査データを蓄積しており、試験開始の約半年が経過したデータまでを整理した。試験区周辺の状況、および試験区の結果の順に以下に示す。

a) 海田湾の海域環境特性

試験区周辺の状況を既存資料によって取りまとめた。平成 22 年度の気象については、暑い夏を裏付けるように広島でも平均気温で前 2 年と比べ 8 月と 9 月で 2 程高くなった。降水量をみると、6 月と 7 月は集中的な降水の影響で平年より多く、8 月～10 月は平年を大きく下回った状態であった⁶⁾。

海域の環境については、広島湾の水質調査結果⁷⁾から測点 No.01 の 7 月～10 月の結果を過年度の結果と比較すると、8 月は 7 月までの多雨の影響から 22 年度が特に表層近くで低塩分、高 D0、クロロフィル a が高いことがわかる。9 月になると、全層で濁度が高く、D0 は前年並に 4m 以深で貧酸素状態 (2mg/L) となっている。なお、海田湾口部の測点 No.02 をみると、D0 が 7 月～9 月で No.01 より 2～4mg/L 高いことから海田湾につながる広島湾からの影響は貧酸素の悪化の観点からはそれほど大きく関与していないと考えられる。

b) モニタリング調査結果

表-1 に示した調査項目から主な結果を以下に列記する。

水質

図-4 は、試験区と対照区 (**図-3**, **表-1** 参照) における施工前後の水質鉛直分布を比較したものである。試験区と対照区では背後地からの流入条件が異なることから、出水による違いはあるものの概ね同じような挙動で変化している。施工後についても大きな違いは認められず、一つの入り江単位では水質の変化まで及ぼしていないと考えられる。

図-5 は、試験区に焦点をあて時期の異なる D0 と濁度の断面分布を比較したものである。また、連続観測結果より、底質 D0 と濁度の平均値を比較して **表-2** に示す。施工後の 8 月では、濁度の変化はないものの D0 が対照区と比べ高くなっており、平均値で小潮期には 0.3mg/L 程度高い傾向である。冬季

では濁度が低下しており試験区での効果が現れつつあることが考えられる。

海域の水質は潮汐などの影響によって時々刻々と変化するため、水質結果の普遍性と短期的な現象について把握するために、夏季には水質の連続観測を実施した。図-6 は試験区と両隣りの対照区とを比較した水温、塩分、流速、濁度、および DO の連続観測結果である。

表-2 底質 DO および濁度の連続観測の平均値

	Time	n	ST.2-1		ST.4		ST.6	
			Ave.	S.D.	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.
DO at B+0.5m (mg/L)	S	625	1.1	0.6	0.6	0.6	0.8	0.5
	N	1535	1.5	0.5	1.8	0.8	1.4	0.4
Turbidity at B+0.2m (ppm)	S	625	7.4	3.6	6.6	3.2	6.2	2.5
	N	1535	3.3	0.8	6.6	5.8	4.6	2.1

The symbol of S and N mean spring tide observation (28. Aug. to 7. Sept.) and neap tide observation (10. Sept. to 14. Sept.).

図-5 施工前後の水質断面分布

図-4 施工前後の水質鉛直分布

果である。9月8日から9日に出水により大きな変化を伴い前後の時期では濁度の変化が異なっている。8日以前は小潮・中潮で流速が弱く浮泥が底層近くで広く漂う状況と解釈できる。一方、9月9日以降では大潮期で流速が強くなり全般的に濁りは軽減される。この時期では試験区での濁度は対照区と比べ低減することが認められた。DOの変化では、8日以前は試験区で高くなっているが、9日以降は広島湾からの影響を受け全体的に上昇している。

図-6 海底面上 0.2m の水温、塩分、流速、濁度および 0.5m の DO の時系列変化

底質

被覆層内および底質の調査結果から含水比、pH、ORP、T-S、IL、PON を図-7 に示す。含水比をみると浮泥の性状が明らかに異なることが判る。対照区で夏季 550%，冬季 300%に対し試験区は夏季 50～100%，冬季 25～150%で 5cm 区画が高くなりつつある。pH は施工直後の試験区では対照区より 1～1.5 高かったが 12 月には 8 程度と 0.5 高い値に低減している。

ORP と T-S は 5cm 区画では対照区と同程度の数値となっているが、10cm および 20cm 区画では改善している。IL と PON も同じ傾向で 5cm 区画は対照区と同程度であるが、10cm および 20cm 区画では低減している。夏季から冬季にかけて 5cm 区では対照区の数値に近づく傾向となっている。沈降粒子は IL、PON 共に高く、水中から海底に達して分解等で低くなるが、試験区ではさらに低減することが判る。

(a)含水比

(b)pH

(c)ORP

(d)T-S

(e)IL

(f)PON

図-7 底質調査結果

間隙水の水質

底質間隙水および被覆層内の水質を図-8 に示す。試験区での栄養塩濃度は低く、硫化水素は検出しなことが判る。試験区では底質からの栄養塩溶出を制御しており、また、石炭灰造粒物の硫化水素の吸着効果⁸⁾等により、硫化水素濃度が低減し、生物の生息環境が改善されていることが判る。

(a)NH4-N

(b)PO4-P

(c)H2S

図-8 間隙水の水質

底生生物

図-9 に試験区中央部における施工前後の底生生物の現存量の比較を示す。種類数、個体数、湿重量共に施工前と比べ増加していることが認められる。出現種では、夏季には主にゴカイの仲間である環形動物が多かったのに対し、冬季にはヨコエビ等の節足動物が多く見られた。

図-9 施工前後の底生生物現存量

4. 被覆層の底質改善効果

石炭灰造粒物の海底被覆は、現底質の覆砂効果と水中部の浮泥取り込み効果を狙ったものである。したがって、被覆層が海底面からある程度の高さを保ち、空隙率も確保している必要がある。被覆層の物理的な状態と底質の改善状態を比較検討し、改善効果が発揮できる耐用年数を評価するために、粒子の挙動と特質について整理した。

(1) 被覆層間隙体積に占める浮泥体積の割合

図-10 に被覆層間隙体積に占める浮泥体積の割合の変化を示す。施工直後から3区画の違いをみると、5cm 区画が時間と共に増加し12月には40%程度となっている。一方、他の2つの区画では、むしろ低下傾向を示している。施工後半年間の期間内の比較では、明らかに5cm 区画が異なった推移で間隙率が減少している。

その要因としては、浮泥が層内で増えると固液混相流状態が強まり鉛直密度勾配が大きくなり、新たに海水が侵入した際の海水交換の低下に働くことが考えられる。

(2) SSの動態

浮泥の動態を模式的に示すと図-11 のように表すことができる。水中部のSSは徐々にではあるが沈降し、被覆層の表面に堆積するものと、層内に取り込まれるものに分かれる。層内に取り込まれたSSは間隙層に堆積し、さらに原地盤の底質に移動するもの、水平的に消失するもの、分解によって形状を変えるものなど、幾つかの要因で堆積物は減じることになると考えられる。なお、夏季と冬季と2分しているが、沈降は積算の数値であり表層および間隙部の堆積は瞬間値であるため、正確な出入りを表しているものではない。

沈降、表層への堆積、間隙部への堆積、および収支として算出される消失分について、7、8月と9月から12月の2期間での概略のフラックスとして示している。

表層への堆積は、いずれの区画でも12月には0に近づき定常状態になりつつ、被覆層間隙への堆積は5cm 区画では増加、10cm 区画ではほぼ0、20cm 区画ではマイナスに変わっている。5cm 区画では堆積が進み本来の機能が低下し、10cm と20cm 区画では被覆層の初期の形状を保ち改善機能が発現されていることが予想される。

図-10 被覆層間隙体積に占める浮泥体積の割合

(a) 夏季 (7~8月)

(b) 冬季 (9~12月)

図-11 被覆層間におけるSSの動態

(3) 被覆層内の浮泥の質的变化

3. で示したモニタリング調査結果から、5cm 区画の底質が他の2つの区画と違いが生じ始めていることが想定される。IL, PON 等の値が対象区に近づく方向で変化し始めていること、上記に示した被覆層間隙部への堆積増加が進んでいることから、改善効果は12月時点で発揮されなくなったものと判断できる。また、収支として算出した消失分の要因や内訳については今後の課題ではあるが、有機物の分解による減容化は IL や PON の低下をみると要因の一つと考えられる。

(4) 舞い上がりの抑制効果

沈降物調査は、上記の3区画と対照区の2箇所でも実施した。夏季の沈降フラックスは、ST.6 で $220\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$ 、ST.4 で $100\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$ 、冬季は ST.4 で $270\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$ (ST.6 は欠測) であった。冬季で対照区と試験区を比較すると、5cm 区画では同程度、他2区画では 1/3 程度である。このことより、10cm および 20cm 区画では明らかに浮泥が再度舞い上がる現象を抑制しており、5cm 区画ではその機能が低下し、舞い上がり抑制の観点からもほぼ原地盤と同程度の状態に戻ったものと判断される。

5. まとめ

海田湾において、石炭灰造粒物の海底被覆による海域環境改善効果の実証実験を開始し、概ね半年が経過した段階での成果を取りまとめた。今後、継続したモニタリング調査を行う計画となっており、さらに詳細な機構解明に向けた研究を行う予定である。本研究はその途中段階ではあるが、環境改善に資する方策として有用性が確かめられ、判明した現象を中心に報告した。得られた主な結論を以下に取りまとめた。

1) 改善効果の目標として、被覆層における浮泥の封じ込み、水底質の改善、および生物生息環境の向上の3点について、いずれも効果が認められた。

2) 被覆層間隙体積に占める浮泥体積の割合が指標となり得ることが判り、5cm 区画では 40% に達し、ORP, T-S の底質項目についても対照区との相違がなくなりつつある。今後の推移を確認し、耐用性の検討に有用な資料となると考えられる。

3) 10cm および 20cm 区画では、半年経過した段階では概ね初期の状態を保ち、ORP, T-S, IL, PON の底質項目から環境改善効果が発揮できていると考えられる。ただし、水質や生物は底質の影響が間接的に寄与する項目であると考え、継続的に推移を確認する必要がある。

4) 今後の課題としては、環境改善の効果を発現するメカニズムを解明し、より効率的な方法を整理する必要がある。また、被覆範囲と水質、生物への改善効果との関係を明らかにして、広範な海域への適用性について検討できる調査を継続する必要がある。

参考文献

- 1) 第6次水質総量規制の在り方について(答申):平成17年5月,中央環境審議会。
- 2) 広島湾再生行動計画:平成19年3月,広島湾再生推進会議。
- 3) 西田芳浩,川内清光,山本裕規,首藤啓,日比野忠史:広島湾における効果的な底質改善技術の効果の検証,海洋開発論文集,Vol.25, pp.407-412, 2009。
- 4) 井上省吾,日高和幸,木村道夫,日比野忠史,首藤啓:石炭灰造粒物の海底散布時の沈降・めり込み特性,海洋開発論文集,Vol.26, pp.129-134, 2010。
- 5) 日比野忠史,三戸勇吾,今川昌孝,駒井克昭,木村道夫:ヘドロ被覆設計のための海底有機泥挙動の把握,海洋開発論文集,Vol.26, pp.141-146, 2010。
- 6) 気象庁 HP, 広島地方気象台の過去の気象データ
- 7) 環境保全調査, [オンライン] http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN6/2_kaisho/suishitu/hiroshimawan.htm, 平成22年2月,第六管区海上保安本部
- 8) 浅岡聡,山本民次,早川慎二郎:石炭灰造粒物による硫化物イオンの除去,海洋開発論文集 Vol.32, pp.363-368, 2009。