

ヘドロが堆積する内湾での人工覆砂材による 底質改善効果

ENVIRONMENTAL QUALITY IMPROVEMENT BY SAND COVERING OF ARTIFICIAL MATERIALS IN THE BAY THAT SLUDGE DEPOSITS

藤原哲宏¹・日比野忠史²・齊藤直³・阿部真己⁴

Tetsuhiro FUJIWARA, Tadashi HIBINO, Tadashi SAITOH and Masami ABE

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(工) 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 博(工) ㈱エネルギー・エコ・マテリア (〒730-0042 広島県広島市中区国泰寺町1-3-32)

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

In recent years, the environment improvement of marine pollution due to the eutrophication of the clay bed at the sea bottom has been considered. Various methods have been developed as covering method to reduce and to prevent the elution of the eutrophic elements such as phosphorous, nitrogen compound and sulfide from sea bottom sediment to sea water.

In this study, a new method for restoration of sea water pollution has been developed to cover sea bottom sediment by using fly ash. The grain size of fly ash ranges from 5 to 40 mm, so that it can be considered that the eutrophic elements will be trapped in pore structure of fly ash. The field experiment and laboratory experiment results suggested that covering fly ash trapped sediment in porous media and reduced the suspended sediment on covering layer. Moreover, the settlement of surface sediment could estimate by using water content of sediment.

Key Words : *bottom deposit, sand covering, eutrophic elements, fly ash, consolidation resuspension, water content, water quality, new formation sediment*

1. はじめに

人口集中地区に隣接した沿岸部の内湾では、栄養塩が流入して富栄養化するとともに、水質浄化機能を持つ海浜や干潟・藻場などの浅場は、社会活動に伴う埋め立てによりその多くが消滅し、閉鎖性水域では水質が急激に悪化して、赤潮やこれに連動した青潮の発生が頻発するようになった。

現在では、各地の閉鎖性水域において、多様な生態系を回復するために、水底の底質改善による栄養塩の溶出抑制や水質浄化機能を持つ場を修復および再生して、赤潮や貧酸素水塊の発生軽減および藻場、干潟、浅場などの多様な生物の生息場の回復が進められている^{1), 2)}。

既存の底質改善技術は、底質改善剤等の改質材料を水中に沈めるもので、何れの改質材料も水底の表面付近に設置または散布されるために、その表面への新生堆積物(覆砂等施工後の新たな堆積物)の再堆積による改善効果の低下^{2), 3), 4)}や新生堆積物の巻き上がりが課題となっている。

筆者らは、石炭火力発電所から発生する石炭灰を

粒状に加工した石炭灰造粒物を用いた底質改善技術を確立するために、水質・底質環境の悪化が著しい広島湾奥部の海田湾において現地調査と実証実験を進めている。

本研究では、被覆材による底泥の圧密挙動や巻き上がりなどの室内実験と実施工場所での3年経過時の現地調査により、栄養塩溶出抑制、新生堆積物再堆積対策および巻き上がり抑制という石炭灰造粒物による底泥被覆の底質改善効果を検証した。

2. 試料採取区域の概要

本実験試料は、図-1に示す広島湾で最も水質・底質汚濁が進んだ広島湾北部海域の海田湾で採取した。広島湾は閉鎖性海域である瀬戸内海に位置し、宮島(廿日市市)や能美島(江田島市)等により北部海域と南部海域に区分され、北部海域には海田湾等の多くの小規模な湾が存在している。

来島海峡最強時における海田湾沖の広島湾北部海域の潮流は、 $0.2 \sim 0.5 \text{ kt}^{5)}$ ($10 \sim 25 \text{ cm/s}$)であり、

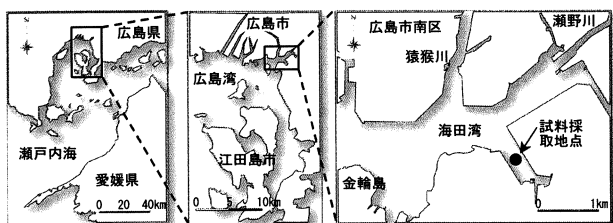


図-1 試料採取地点（広島湾・海田湾）の位置

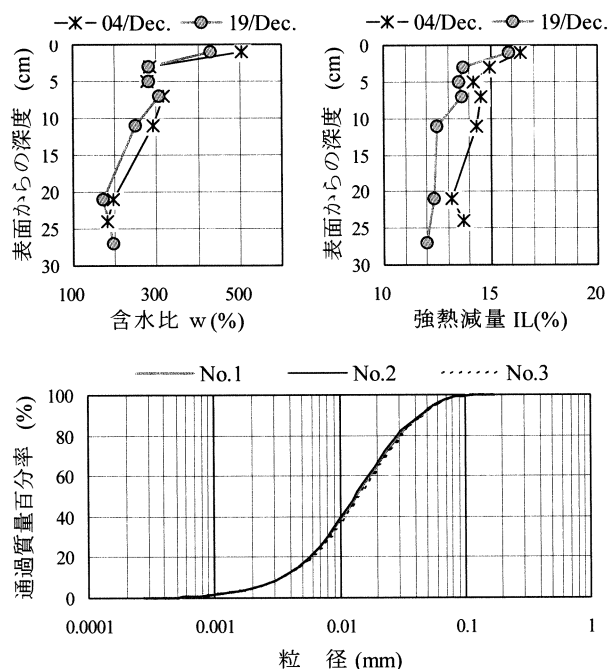


図-2 採取試料の含水比，強熱減量，粒度組成

河川からの淡水流入により，上層では湾口に向かって海水が流出し，下層では逆に湾奥に向かって海水が流入する河口循環流が発達している。

海図水深約 8m の試料採取地点は，静穏な海田湾内においても更に静穏で，底質の強熱減量は海田湾内の他地点よりも高い値を示している。

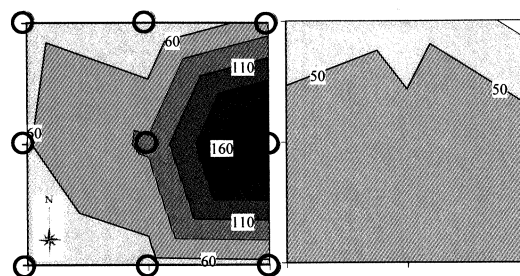
(1) 採取試料の性状

底質試料は，2008 年 12 月 4 日と 19 日に円柱状サンプラー（内径 ϕ 18.3cm, 11.0cm）を用いて，表層より 40cm 程度までの乱さない試料を採取した。3 章で示す圧密実験にはこの試料を用いている。

採取した底質試料の性状を図-2 に示す。含水比は表層 1cm で 430～500%，深度 3～7cm で 275～315% であり，深度 20cm 以深では 170～195% である。強熱減量は表層 1cm で約 16%，深度 3～7cm で 13.5～15.0% である。表層から深度 30cm 程度までの平均的な粒度組成は，細砂分 (0.075～0.425mm) が 2%，シルト分 (0.005～0.075mm) が 81%，粘土分 (0.005mm 以下) が 17%（内，0.001mm 以下：2%）である。

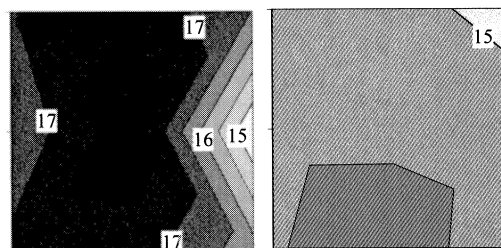
(2) 沈降・堆積する有機泥の性質

図-3 には，10 月期（9 月 29 日～10 月 14 日）と 12 月期（12 月 4～19 日）に海底に 1m 間隔で設置さ

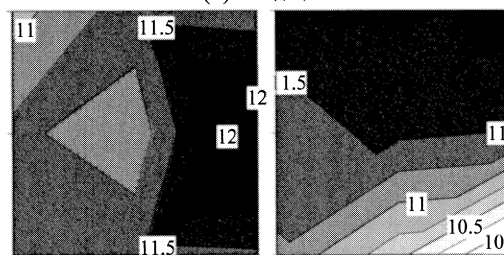


(a) セジメントトラップ量 (g/m²/日)

○はトラップ設置地点



(b) IL (%)



(c) C/N

10月期

12月期

図-3 海底に設置された9個のセジメントトラップ（1m間隔）に沈降した(a)有機泥のセジメントトラップ量と有機物性状 (b) IL, (c) C/N比

れた 9 個のセジメントトラップに沈降した(a)有機泥のセジメントトラップ量と有機物性状 (b) IL, (c) C/N 比) を示す。12 月期の観測では，セジメントトラップを海底とともに海底面上 3m の海中にも設置している。各捕捉量は，海底から 3m 上方での 0.54g/m²/日に対して，海底では 48.6g/m²/日であり，2 オーダー海底での捕捉量が多くなっている。

セジメントトラップの捕捉量が海中よりも海底において 2 オーダー大きいこと，図-3(a)に示されるように 2m×2m の狭い範囲においてもセジメントトラップ量に分布があることから，有機泥は上層からの沈降のみによってたまったものではなく，底層を移流・沈降した有機泥が捕捉されていることがわかる。10 月期の観測期間においては，POC の含有量が多く（分解が進んだ有機泥，あるいは油脂分を多く含む有機泥），有機物含有量の少ない多量の（右側中央のセジメントトラップ量が他のトラップ量の 2.6 倍以上，図-3(a)）有機泥が右方向から移流しているのが顕著に現れている。

12 月期に捕捉されたセジメントトラップ量は空間平均的には 10 月期と同程度であるが，捕捉された有機泥の性状，量が異なっており，水質の変動が底層有機泥の移流・沈降に与える影響は小さくない

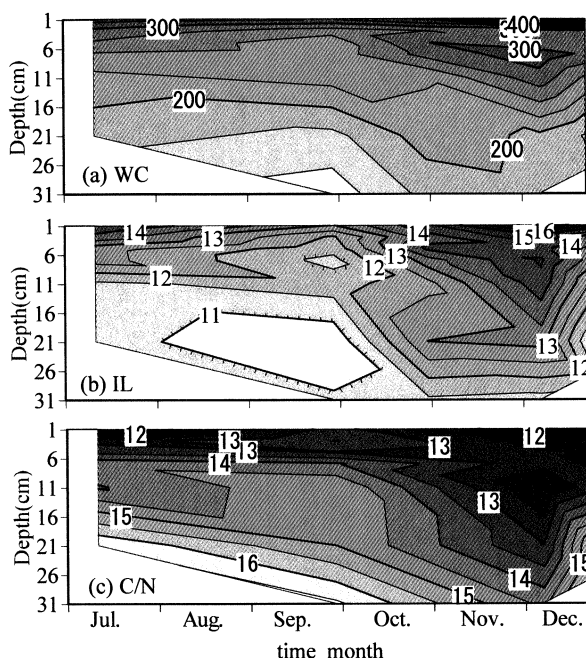


図-4 海底堆積泥の泥質の季節変動
(上段から(a)含水比, (b)IL, (c)C/N比)

と考えられる。強熱減量は、10 月期よりも小さいが、C/N 比は両期とも平均的に 11 程度であった。

(3) 海底堆積泥の泥質分布の季節変動

図-4 に 2008 年 7 月 10 日、9 月 28 日、10 月 28 日、12 月 4 日、19 日に採取された海底堆積泥の泥質 ((a)含水比, (b)IL, (c)C/N 比) の季節変動を示した。堆積泥の含水比および有機物性状は 7 月から 10 月まで顕著な変動は現れていないが、11 月から 12 月に向かって、含水比は泥深 20cm 程度まで約 100%の増加があり、相対的に C/N 比の低い有機成分が増加している。

沈降物調査によるセジメントトラップ捕捉有機泥の有機物含有量 (図-3(b) IL) は、10 月期 (9 月 29 日～10 月 14 日) には堆積泥 (図-4(b) IL) に比較して含有量が多いのに対し、12 月期 (12 月 4～19 日) では堆積泥と同程度の含有量である。この現象から 10 月期に底層を移流する有機泥は沈降量が少なく、浮遊状態にあるのに対し、12 月期になると浮遊傾向にあった有機泥が沈降しやすい環境に変わることが予想される。

3. 柱状不攪乱試料を用いた圧密実験

覆砂層厚は、底生生物に対する物理的影響を緩和して、底生生物が這い出し易く、生物再形成を容易にするために、覆砂層厚を 12in (約 30cm) 以内⁶⁾とする考え方がある。また、底質改善効果、栄養塩溶出削減効果および底生生物の生息環境改善効果等から必要とされる平均厚に施工精度を考慮して施工層厚が決定されている事例もある。

表-1 圧密実験条件

試料番号	試料径 (cm)	試料高 (cm)	覆砂材	覆砂材 気中重量(g)	有効単位重量 (gf/cm ²)
L1	18.3	30.0	40mm 造粒物	489.8	0.88
L2	18.3	40.0	"	941.6	1.70
L3	18.3	42.0	"	1,386.6	2.50
L4	18.3	35.1	"	514.7	0.93
L5	18.3	33.8	"	973.3	1.76
L6※1	18.3	36.2	40mm 造粒物 (乾燥材料)	814.1	1.21
L6※2				536.2	0.16
S1	11.0	35.0	砂	50.0	0.32
S2	11.0	39.0	"	100.0	0.65
S3	11.0	35.0	"	200.1	1.29
S4	11.0	28.0	粉碎カキ殻 2mm 造粒物	229.1	1.14
S5	11.0	34.4	2mm 造粒物	135.8	0.68
S6	11.0	31.9	砂	50.0	0.32
N1	11.0	25.0	無(自然圧密)	—	—
N2	11.0	35.9	"	—	—

※1：実験終了後の湿潤状態での重量

※2：実験(投入)前の乾燥状態での重量

・04/Dec. 採取試料：L1～L3, S1～S4, N1

・19/Dec. 採取試料：L4～L6, S5～S6, N2

・40mm：長径40mm, 短径20mm程度の石炭灰造粒物

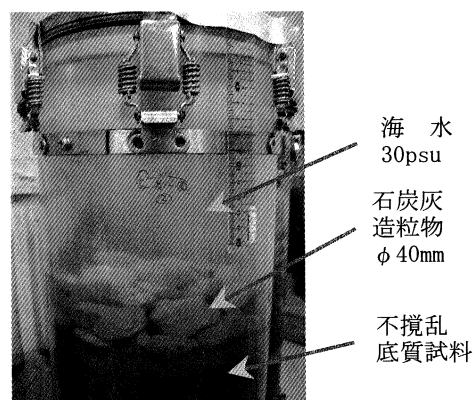


写真-1 圧密実験の状況 (φ18.3cm)

一方で、新生堆積物堆積後の分解の進行と新生堆積物に含まれる窒素およびリンの水中への回帰⁴⁾、新生堆積物の水中への巻き上がりによる水質改善能力の低下への対策は十分ではないと考えられる。

石炭灰造粒物の窒素およびリンの吸着効果は天然砂に比較して高く、石炭灰造粒物による覆砂はリンの吸着による底質の改善効果が確認されている⁷⁾。したがって、石炭灰造粒物による覆砂では、底質の巻き上がりが水質環境悪化の要因と考えることができる。室内実験では、不攪乱試料上に覆砂材を投入することにより圧密排水による表層の含水比の変化および覆砂材の底質表面へのめり込み状況を確認した。

圧密実験は、円柱状サンプラーで採取した不攪乱底質表面に覆砂材を層厚が均等になるように静かに置き、時間とともに進行する覆砂材のめり込み量と柱状底質試料の体積変化を計測するとともに、実験終了時の深度毎の含水比と湿潤密度を計測した。

表-1 に圧密実験条件を示す。試料番号 L6 の覆砂材試料としての石炭灰造粒物は、100℃の乾燥炉で

水分を除去し乾燥状態にしたものであり、L6 を除く石炭灰造粒物は、30psu の塩水で飽和した状態である。また、L2(体積: $V=480\text{cm}^3$)、L5($V=488\text{cm}^3$)および L6($V=483\text{cm}^3$)の石炭灰造粒物の体積量は概ね同値になるように調整している。

写真-1 に内径 18.3cm の円柱状サンプラーと長径 $\phi 40\text{mm}$ 、短径 $\phi 20\text{mm}$ の石炭灰造粒物を用いた室内圧密実験の状況を示す。

(1) 石炭灰造粒物覆砂材の底質泥へのめり込み量

図-5 に浮力を考慮した覆砂材による有効単位面積荷重と底質泥へのめり込み体積の関係を示す。L4 と L5 を比較すると、投入覆砂材の体積は 270cm^3 から 488cm^3 に 1.8 倍であるが、めり込み体積は 23.2cm^3 (8.6%) から 73.5cm^3 (15%) に 3.2 倍の増加であり、L3 のめり込み体積は投入体積の 23% である。覆砂材の底質泥へのめり込み損失率は、投入覆砂材量の増加率より大きく、覆砂材の多量投入はめり込み損失量を増加させると考えられる。また、覆砂材体積のほぼ同じ L2、L5、L6 のめり込み体積から乾燥状態の覆砂材の投入は、底質泥へのめり込み量を低減する効果が期待できることがわかる。

(2) 覆砂材による底質泥の圧密

図-6 に覆砂材の有効単位面積荷重と底質泥の鉛直ひずみの関係を示す。底質表面の沈下量(除、めり込み量)は試料の全高さにより相違するので、本実験では沈下量(Δh)を試料全高(h)で除したひずみ(ε)で表した。また、24 時間以上の時間において沈下量に変化がない場合を実験終了とした。

$\phi 40\text{mm}$ の石炭灰造粒物を用いた実験(L1~L6)では、最終鉛直ひずみは有効単位面積荷重の増加とともに大きくなる傾向があると判断できるが、全 12 試料の実験結果では、最終鉛直ひずみと有効荷重との関係は明確でない。L1~L6 と S1~S6 の比較から粒径や単位体積重量の相違は、圧密沈下状況に影響しないと判断することができる。

図-7 に試料の含水比分布と自重圧密による変化を示す。自重圧密により表層(深度 1cm)では含水比が 400%および 430%に低下しているが、深度 3cm 以深の自重圧密前後での含水比変化は表層と比較して小さく、現地海底の表層は直上水や間隙水の流動の影響を受けていると考えられる。

図-8 に圧密後の深度方向の含水比と湿潤密度の分布を示す。各々の試料における含水比と湿潤密度の関係は一致しているが、覆砂材の有効単位面積荷重との関係は明確ではない。

図-9 に表層(深度 1cm と 3cm)の圧密後の含水比と覆砂材の有効単位面積荷重の関係を示す。深度 1cm の含水比は 270~350%、深度 3cm の含水比は 220~290%であるが、圧密後の含水比は有効荷重と関連なく一定範囲に収斂している。この状況は、図-6 に示す鉛直ひずみとの関係と一致している。

図-10 に表層(深度 1cm)の含水比の圧密前後の

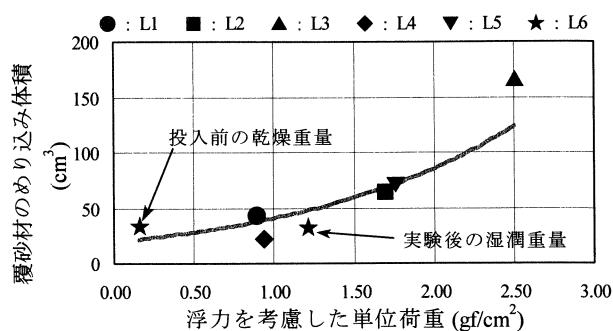


図-5 覆砂材の有効単位面積荷重とめり込み体積

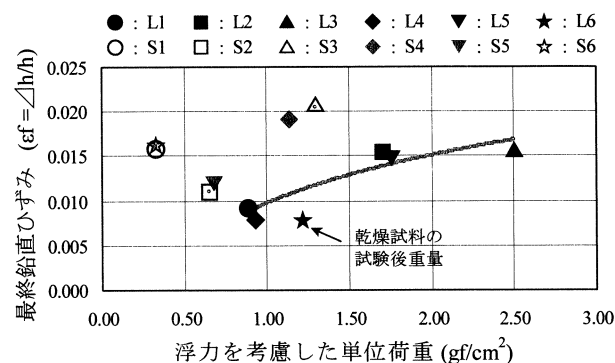


図-6 有効単位面積荷重と底質泥最終鉛直ひずみ

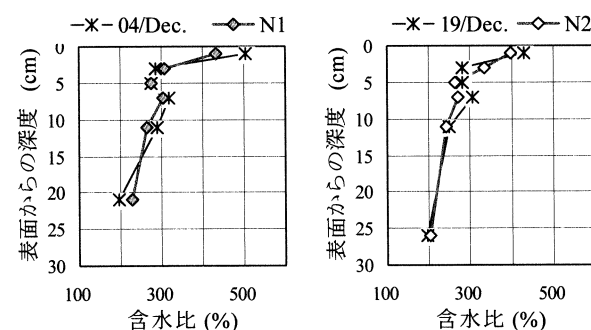


図-7 不攪乱試料の含水比分布の自重圧密による変化 (N1: 圧密期間1週間, N2: 同3週間)

差を示す。 $\phi 40\text{mm}$ の石炭灰造粒物を用いた実験(L1~L6)では、圧密による含水比の低下量は有効単位面積荷重の増加とともに大きくなる傾向があると判断できるが、全 12 試料の実験結果では、圧密による含水比の低下量と有効荷重との関係は明確でない。この関係も図-6 に示す鉛直ひずみと有効荷重との関係と一致しており、実験精度の裏付けとなる。

底質表層の含水比が 500%から 350%ないし 300%に低下すると体積は約 30%収縮するので、本実験による沈下(3~7mm)は、表層 3cm 程度までの排水現象であると考えられる。

本実験での覆砂材の有効荷重 $0.3 \sim 2.5\text{gf/cm}^2$ ($0.03 \sim 0.25\text{kPa}$)は、底質泥の層厚($\rho_t = 0.2\text{gf/cm}^3$ (2mN/cm^3)) 2~12cm に相当する。図-2 に示すように本地点の表層 3~11cm の自然含水比が 250~320%であること、図-9 に示す圧密後の含水比が深度 1cm

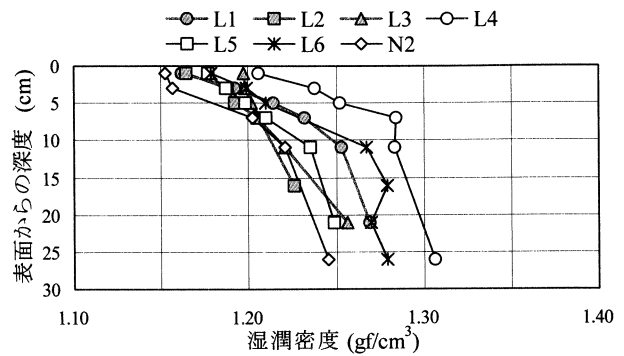
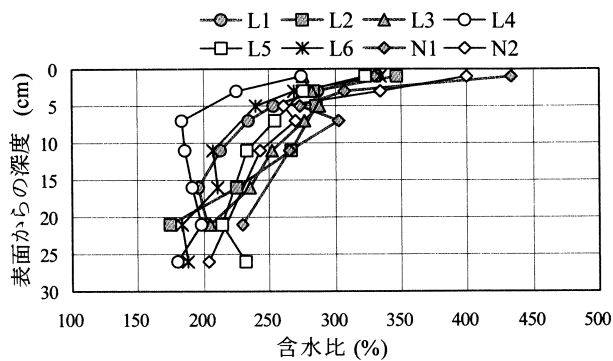


図-8 圧密後の含水比と湿潤密度の分布

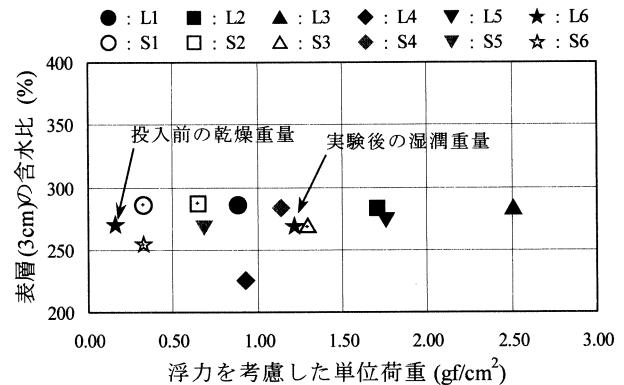
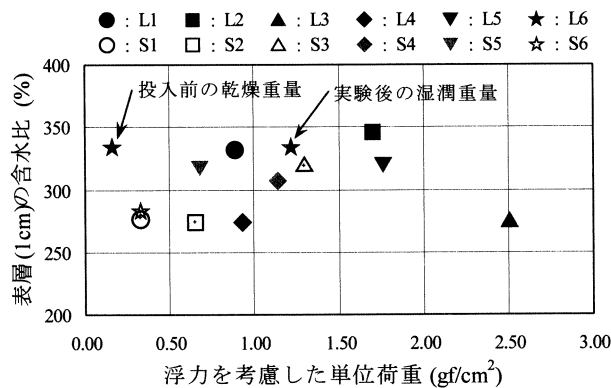


図-9 表層（深度1cmと3cm）の圧密後の含水比と有効単位面積荷重の関係

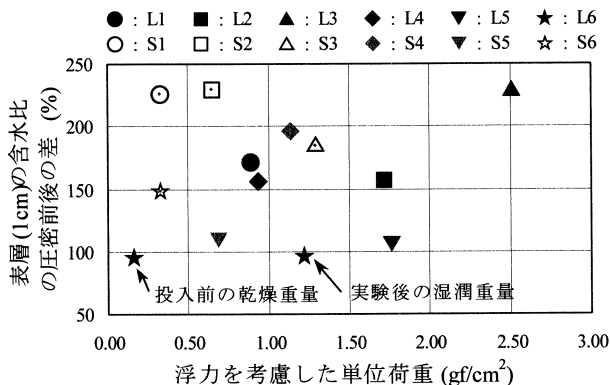


図-10 表層（深度1cm）の含水比の圧密前後の差

で 270～350%, 深度 3cm で 220～290%であることより, 覆砂材投入による表層の圧密量は含水比より予測できると考える。

4. 実施工場所での被覆効果の確認

(1) 石炭灰造粒物の現地施工状況

写真-2 は, 石炭灰造粒物と砂による覆砂施工 3 年後における被覆層鉛直試料をアクリルパイプにより採取して, 被覆層を目視観察した状況である。砂被覆では上部への新生堆積物の再堆積と砂被覆層の変色が確認され, 間隙に新生堆積物の一部が浸入していると考えられる。一方, 石炭灰造粒物被覆では上部への再堆積は無く, 新生堆積物は被覆層内の間

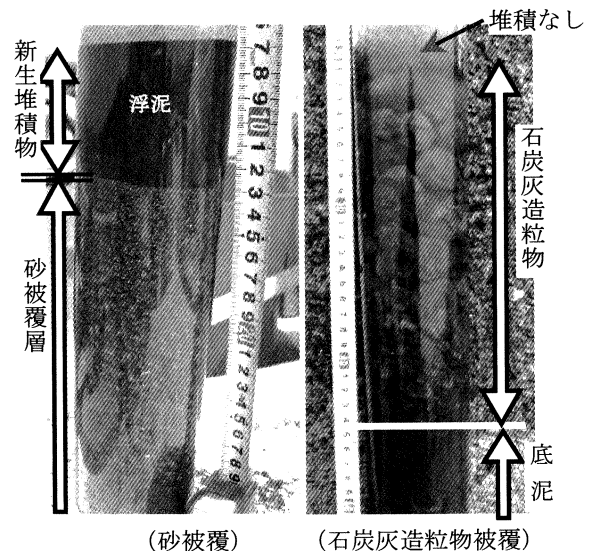


写真-2 新生堆積物の堆積状況

隙に捕捉された状況にあった。

(2) 石炭灰造粒物の被覆材としての効果

被覆層内間隙水の全窒素および全リンの経年変化を図-11 に, 酸化還元電位(ORP)の変化を図-12 に示す。施工 3 年後における間隙水の T-N には, 石炭灰造粒物内と砂層内に差異はないが, T-P には環境基準の類型⁸⁾が異なる程度の差異があり, 底質からの栄養塩の間隙水への溶出, または, 間隙内に捕捉された新生堆積物からの栄養塩の溶出が考えられる。

石炭灰造粒物による被覆区の間隙水の ORP 値は砂

被覆区より高く、経年的に増加傾向にあり、被覆層内の間隙水の流動により好気的環境が継続していると考えられる。被覆直上水の溶存酸素(DO)の変化を図-13に示す。直上水のDOには季節的な変動はあるが、両被覆区で好気的環境が維持されている。

石炭灰造粒物による覆砂では、透明度の改善、石炭灰造粒物への藻類や貝類の着生、ベントスの生息が確認されており⁹⁾、石炭灰造粒物による被覆は、間隙水の流動により溶出する底質の栄養塩や間隙に捕捉された新生堆積物からの栄養塩を生物相の回復により吸収・分解すると考えられる。

5. おわりに

海田湾海底では底層を移流する有機泥が卓越し、浮遊傾向にあった有機泥は冬季に沈降、堆積しやすい環境にあることが推定された。このような環境下では本論文で提案する石炭灰造粒物の巻き出し(覆砂)は有効な手段であることが明らかにされた。

石炭灰造粒物による覆砂について、室内実験および現地調査を実施した結果から石炭灰造粒物による覆砂の特徴は次のように整理される。

- (1) 乾燥状態の石炭灰造粒物の散布は底質泥へのめり込み量の低減が期待できる。
- (2) 石炭灰造粒物と砂等との粒径や単位体積重量の相違は覆砂工による底質表層の圧密に影響しない。
- (3) 覆砂材投入による底質表層の圧密量は底質層の含水比より予測できる。
- (4) 間隙が砂と比較して大きい石炭灰造粒物による覆砂工は、新生堆積物を間隙に捕捉して表層への再堆積の低減が確認された。
- (5) 石炭灰造粒物による被覆は、底質から溶出する栄養塩や新生堆積物からの栄養塩を吸収・分解すると考えられる。

なお、覆砂工に求められる①底質改善、②生物相回復、③水質改善の効果をj得る最適施工厚については、現地施工調査の継続が必要である。

謝辞：本研究は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の支援を受けて行った調査結果を用いている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 広島湾再生推進会議：広島湾再生行動計画，pp. 28～34，2007。
- 2) 福岡市港湾局：エコパークゾーン香椎地区（御島）シーブルー事業効果把握調査報告書，pp. 1～4，pp. 21～26，2004。
- 3) 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所：平成18年度名古屋技調報告-伊勢湾における貧酸素水塊改善検討-，pp. 1～4，2006。

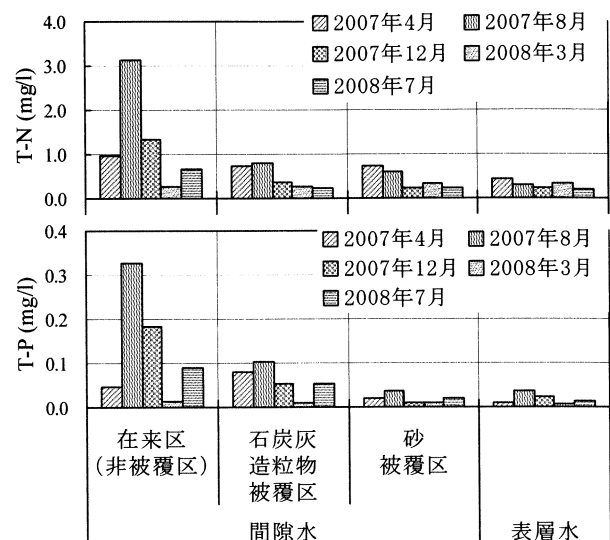


図-11 間隙水のT-N, T-Pの変化

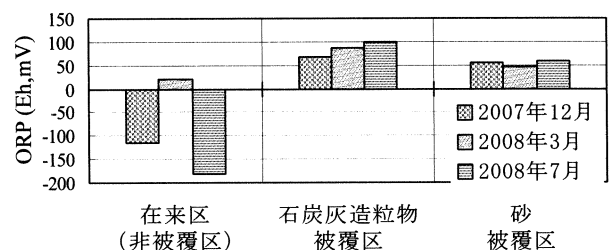


図-12 間隙水の酸化還元電位の変化

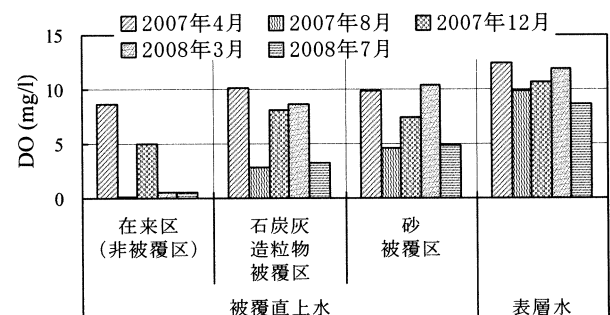


図-13 被覆直上水のDOの変化

- 4) 宮岡修二，山本縁，辻博和：閉鎖性水域における新生堆積物の挙動に関する実態調査，大林組技術研究所報 No. 63，pp. 91～96，2001。
- 5) 海上保安庁：広島湾及び安芸灘潮流図，1993。
- 6) United States Environmental Protection Agency，U.S. Army Corps of Engineers：Evaluating Environmental Effects Of Dredged Material Management Alternatives -A Technical Framework-，pp.34～35，2004。
- 7) 池田陵志，齊藤直，松崎和征，車田佳範：Hi ビーズによる環境改善効果について，土木学会年次学術講演会講演概要集第7部，58巻，pp.627-628，2003。
- 8) 環境省：水質汚濁に係る環境基準について-別表2 生活環境の保全に関する環境基準 2 海域-，環境庁告示第59号（改正：平15環告123）
- 9) 福岡晴美，入江功四郎，齊藤直，武部真実，神庭治司，藤井勲：汽水域における石炭灰造粒物（Hi ビーズ）の環境改善効果，土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，62巻，pp. 2-060，2007。