

# 産業系リサイクル材を用いた海底被覆による 海域環境改善技術について

玉井 和久

中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所 調査課(〒730-0051 広島市中区大手町3-13-18松村ビル5F)

都市圏を後背地に抱えた閉鎖性海域においては、污水处理施設の整備・普及等、各種の汚濁負荷削減対策が進み、陸域から海域への汚濁流入負荷は減ってきているが、依然として赤潮や貧酸素水塊の発生により、生物が生息しにくい環境となっている。その主な原因として、これまでに蓄積された海底泥の有機汚濁が悪影響を及ぼしていると思われる。

本稿では、海底泥を産業系リサイクル材の石炭灰造粒物で被覆する海域環境改善技術について検討した結果を概説する。

キーワード 閉鎖性海域、貧酸素、海域環境改善技術、産業系リサイクル材、石炭灰造粒物

## 1. 背景

内海や内湾のように、外部との海水の交換がされにくい海域のことを一般に閉鎖性海域と言う。

湾奥部の閉鎖性海域では、様々な物質が流入して滞留し、海水の交換も少ない為、汚濁物質が蓄積しやすい。このことから、水質汚濁の進行が速く、改善もしにくいという特徴がある。

近年では、污水处理施設の整備・普及等、各種の汚濁負荷削減対策が進み、陸域から海域への汚濁流入負荷は減ってきているが、都市圏を後背地に抱えた湾奥部の閉鎖性海域においては、依然として赤潮や貧酸素水塊（魚などが生存出来ない程度まで溶存酸素濃度が低下した水の塊）が発生し、生物が生息しにくい環境となっている。

その主な原因として、海底に蓄積された泥（海底泥）の有機汚濁の影響が指摘されている。

中国経済産業局が2009年にまとめた「閉鎖性水域の海域別調査（瀬戸内海）報告書」<sup>1)</sup>によると、広島湾奥部では、海域全体の酸素消費のうち海底泥での酸素消費が50%近くを占めており、広島湾奥部の貧酸素水塊の発生を抑制する為には、底質を改善することが有効な手段であるとしている。また、同報告書によれば、貧酸素水塊の発生頻度が特に高い場所を重点的に底質改善することで、底質改善を行っていない周辺海域の貧酸素水塊の発生が抑制されるなど、波及効果が高いことも示されている。

底質改善の手法としては、浚渫や覆砂などが一般的である。浚渫は、海底泥を取り除く方法で、覆砂は海底泥の上に砂を撒いて被覆し、海底泥を閉じこめる方法であ

る。

浚渫の場合は、取り除いた大量の海底泥の処分が課題で、埋め立て地の需要が減少している昨今の状況では、処分先の確保が難しい。また、覆砂の場合は、海底泥を覆う為の大量の砂を確保する必要があるが、瀬戸内海においては、平成20年に海砂採取が全面禁止されており、被覆材としての砂の確保が困難になっている。

また、浚渫や覆砂の施工後に、新たに沈降してくる有機物（プランクトンの死骸など）が堆積し、再び海底の泥となって、浚渫や覆砂の効果が低下することが懸念される。

従来工法の浚渫や覆砂には、以上のような課題があり、新たな底質改善技術の開発が求められている。

## 2. 新たな底質改善技術の検討

閉鎖性海域における新たな底質改善技術を検討するに当たり、その実験フィールドとして、広島湾奥部の海田湾を選定し、既往の調査研究結果や現地調査から、貧酸素水塊の発生要因を推定し、改善手法の検討を行った。

### (1) 貧酸素水塊の発生原因の推定

海田湾における既存の調査・研究結果によると、海底泥表面での有機物による酸素消費<sup>1)</sup>や、海底付近で泥が舞い上がり高濁度の海水層（高濁度層）が発生することで、さらに海底付近の酸素が消費されること<sup>2)</sup>などから、貧酸素化が進むことがわかっている。

また本研究における海田湾での調査結果からも、同様の傾向が確認されている。

出水による陸域からの濁水  
(有機物・栄養塩の供給量の増加)

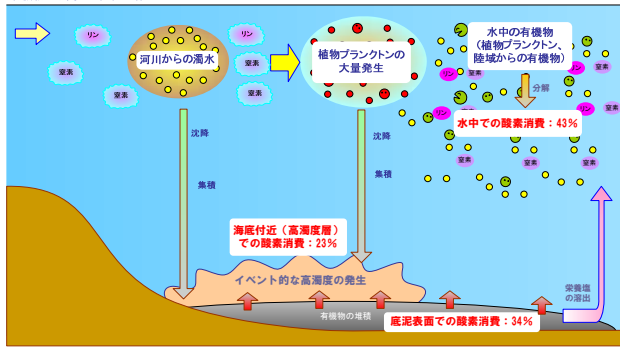


図 2-1 貧酸素水塊の発生メカニズム模式図

図2-1は、本研究で海田湾を調査した結果から解析した、貧酸素水塊の発生メカニズムに関する模式図であるが、海水中の酸素消費の割合は、海底付近における酸素消費(②と③の過程)が、全体の約60%程度を占めていることがわかる。

- ①水中での有機物分解に伴う酸素消費(43%)。
- ②高濁度層内での有機物分解に伴う酸素消費(23%)。
- ③海底泥表面での有機物分解に伴う酸素消費(34%)。

海底泥が巻き上がることで、海水に高濁度の層が形成される。この高濁度層は、有機物を多く含んだ泥(有機泥)が海水に浮遊している状態で、海底泥の中に含まれる栄養塩が海水に溶出する為、酸素の過剰消費につながる。海水中の酸素消費の約60%を占める底泥表面と高濁度層での酸素消費を抑える為には、底泥を浚渫して除去するか、底泥を覆砂して被覆する必要があるが、これら従来工法には先にも述べたような課題がある。

## (2) 新たな底質改善技術の検討

港湾整備事業の従来工法の中で、浚渫による海底泥除去等の底質改善対策は、除去した海底泥の処分先を確保することが難しい為、実現性は低いが、覆砂については、砂の代わりになる材料を確保できれば、実現性が高くなる。さらに、水質や底質を改善する効果がある材料で被覆することにより、覆砂以上の効果も期待できる。よって、新たな底質改善技術は、海底泥を砂以外の材料で被覆する工法で検討した。

貧酸素水塊の発生要因を踏まえ、新たな底質改善技術に求められる機能は次の4点である。図2-2に概念図を示す。

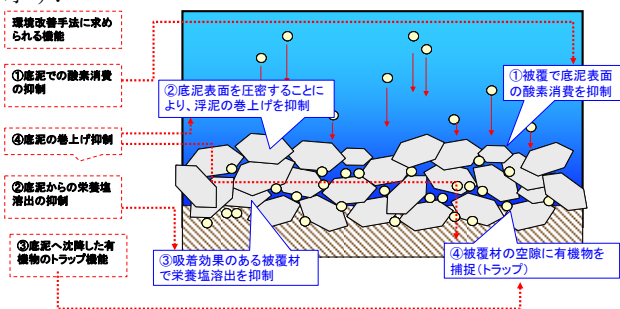


図 2-2 海田湾における底質改善技術概念図

### ①底泥表面での酸素消費の抑制

底泥表面での酸素消費は、底泥表面と水の接触面積に依存すると考えられる為、底泥を被覆することで、底泥表面での酸素消費を抑制する。

### ②底泥の巻き上げ抑制

被覆材を撒いて、底泥を被覆することで、底泥の巻き上げを抑え、高濁度層の発生を抑制する。

### ③底泥からの栄養塩溶出の抑制

吸着効果がある被覆材を撒くことで、底泥からの栄養塩の溶出を抑制し、海水中の有機物量を削減する。

### ④海底に沈降してくる有機物のトラップ(捕捉)

被覆層に間隙を確保できる被覆材を撒くことで、沈降してきた有機物を被覆材の間隙にトラップ(捕捉)し、再懸濁を抑止することで、高濁度層の発生を抑制する。

## (3) 最適な被覆材の選定

砂に替わる被覆材に求められる機能は、以下のとおりである。

- ・被覆層の上に有機泥を再堆積させず、砂よりも効果の継続期間を長くできること。
- ・被覆後に沈降してくる有機泥を捕捉する為の間隙を形成できること。
- ・被覆材そのものに水質や底質の改善効果があること。
- ・被覆材が安定的に確保できること。

被覆材は、循環型社会形成推進の観点から、上記機能を満足する産業系リサイクル材の中から選定した。

現在、産業系リサイクル材で海域環境改善への活用が検討されている代表的な材料として、石炭灰造粒物、鉄鋼スラグ、カキ殻といった材料があり、それぞれに物理的あるいは化学的な特徴がある為、適材適所での活用が必要である。本研究では、これらを用いた実験を行い、上記で述べた「砂に替わる被覆材に求められる機能」を満足する材料として、石炭灰造粒物を選定した。

石炭灰造粒物<sup>3)</sup>は、石炭火力発電で発生する石炭灰(フライアッシュ)をセメントで造粒固化した産業系リサイクル材のことであり、環境再生材の他、地盤改良材としても各地で活用されている。

物理的性質としては、粒径が5mm~40mm程度、強度は10N/mm<sup>2</sup>程度で、密度は2.1~2.4g/cm<sup>3</sup>程度<sup>4)</sup>であり、砂の密度が2.6g/cm<sup>3</sup>程度である為、砂に比べると比較的軽量な材料である。また、多孔質で内部には微細な隙間があり、その隙間の割合は全体の約30%程度である。

化学的性質としては、二酸化珪素(SiO<sub>2</sub>)と酸化アルミニウム(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)が主成分で、全体の70%前後を占めている。その他、酸化鉄(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、酸化カルシウム(CaO)、酸化マグネシウム(MgO)等も含まれている。

石炭灰造粒物には、硫化水素の吸着効果<sup>5)</sup>やリン酸の吸着効果<sup>6)</sup>、付着藻類の増殖効果<sup>7)</sup>など、砂にはない環境改善効果が報告されている。

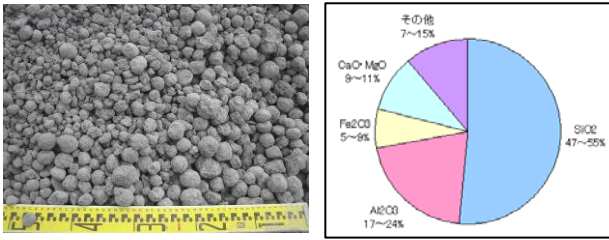


図 2-3 石炭灰造粒物の写真と化学組成<sup>3)</sup>

#### (4) 新たな底質改善技術の検討結果

これまでの検討結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ①閉鎖性海域の貧酸素化を軽減するには、海水中の酸素消費の約60%を占める底泥表面と高濁度層での酸素消費を抑えることが重要である。
- ②水質や底質の改善効果がある被覆材で底泥を被覆することにより、底泥表面での酸素消費と高濁度層の発生を抑制する。
- ③被覆材に産業系リサイクル材である石炭灰造粒物を用いることで、材料自体の水質底質改善効果も期待でき、有機泥を捕捉する為の間隙も形成できる為、効果の継続期間を覆砂より向上させることができる。

### 3. 実証試験による効果の確認

石炭灰造粒物の海底被覆による海域環境改善技術の実海域での効果を確認する為、図3-1に示した広島湾奥部の海田湾において石炭灰造粒物による海底被覆の実証試験を実施し、施工後3年間のモニタリング調査を実施した。

実証試験区は、海田湾の「さか渚公園」の前面約6haの海域に石炭灰造粒物を撒いて、海底を被覆した。

最適な層厚を検証する為、湾口側から20cm, 10cm, 5cmと層厚を段階的に変化させた。(図3-2及び図3-3参照)



図 3-1 実証試験区 (海田湾) 位置図



図 3-2 実証試験区平面図・調査地点図

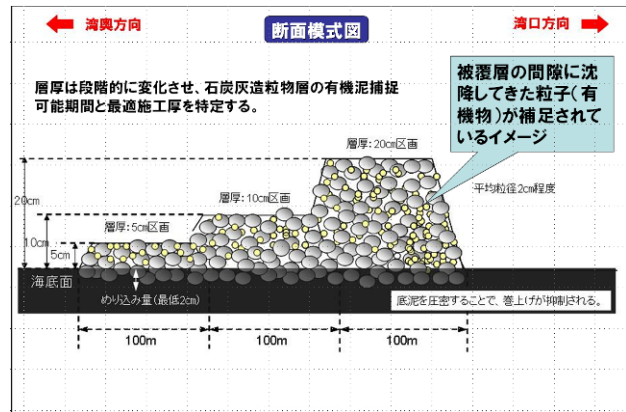


図 3-3 実証試験区断面模式図

評価の視点は、①水質の改善効果、②底質の改善効果、③底生生物への効果、④被覆層への有機物の補足・分解および浮泥の移動抑制効果の4つの視点で改善効果について評価した。

モニタリング調査では、それらの評価に必要な、水質、底質、間隙水、底生生物、浮泥の堆積層厚、被覆層間隙へ占める浮泥体積の割合、沈降粒子量について調査した。

また、施工の効果を明確にする為、石炭灰造粒物を被覆した実証試験区と、一般海域の対照区に調査地点を設けて比較した。調査時期は、夏季冬季1回ずつで2010年～2012年の3年間実施した。

#### (1) 水質の改善効果

DOは、海水中に溶けている酸素の量であり、一般に2～3mg/Lを下回ると生物の生存に影響があるとされる。

実証試験区周辺における底層DOの断面分布は、図3-4に示したとおりで、実証試験区の中央付近で周辺より0.5mg/L程度高く、貧酸素化が緩和されていることがわかる。

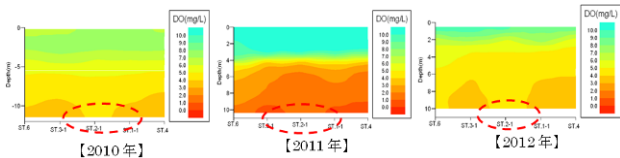


図 3-4 2010～2012 年間の実証試験区周辺の底層 DO

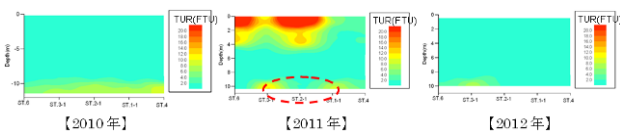


図 3-5 2010～2012 年間の実証試験区周辺の底層濁度

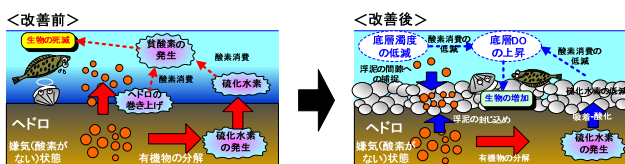


図 3-6 水質の改善効果のイメージ

また、濁度は海水中の濁りを表す指標で、光学系の測定器から求められ、1FTU≒1ppmである。

実証試験区周辺における底層濁度の断面分布は、図3-5に示したとおりで、実証試験区の中央付近で周辺より5.0FTU程度低く、底層の高濁度層が抑制されていることを示している。

このような効果が確認された要因を、水質シミュレーションの結果から考察すると、海底を被覆することで海底の有機物量が減少し、海底表面での酸素消費量が減少したと思われる。また、被覆層内での硫化水素の吸着効果により、硫化水素による酸素消費が抑制されたことも、大きな要因であると考えられる。図3-6に水質の改善効果のイメージ図を示す。

## (2) 底質の改善効果

酸化還元電位 (Eh) は、底質中の酸化還元状態の強さを表す指標で、pHとの関連もあるが+側が酸化状態(酸素が多い状態)を表し、-側が還元状態(酸素が少ない状態)を表す。図3-7に2010～2012年間の実証試験区被覆層内および対照区底泥内のEhの変動を示す。

これを見ると、施工直後は、実証試験区の被覆層内の酸化還元電位 (Eh) は対照区の底泥よりも明確に高く、底泥内の還元的環境が緩和されていることが明らかである。その後、夏季には実証試験区と被覆層内のEhの差は少なくなるが、冬季には実証試験区の被覆層内のEhが高くなり、底泥内の還元的環境が緩和されていることを示した。5cm区画では、2年程度経過すると冬季においても差が無くなることから、底泥内の還元的環境を緩和する効果を得るには、10cm以上の被覆層を形成することが望ましいと言える。

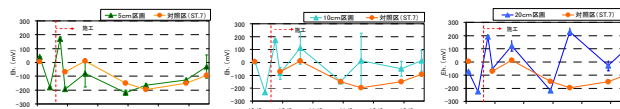


図 3-7 2010～2012 年間の実証試験区被覆層内および対照区底泥内の Eh の変動

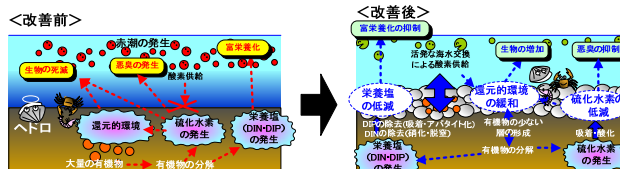


図 3-8 底質の改善効果のイメージ

被覆層内では、単位体積当たりの有機物量が少ない為、有機物を分解する際に伴う還元化(貧酸素化)が進行しにくいことに加え、冬季は被覆層内と直上水の海水交換が活発に生じており、冬季は直上水に酸素が多く含まれている為、Ehが上昇したものと思われる。さらに、被覆層内では還元物質(酸素を消費する物質)である硫化水素の濃度が低下しており、これもEhが上昇した要因と考えられる。図3-8に底質の改善効果のイメージを示す。

## (3) 底生生物への効果

実証試験区では、図3-10に示したとおり、種類数、個体数、湿重量とも増加し、小型の節足動物(コノハエビ)等が優占しており、種類数は冬季に増加する傾向が見られた。

また、モニタリング調査3年目の最終調査結果(2012年12月時点)では、大型で長寿命のイシガニ等の甲殻類や、エビ類等の節足動物が多く見られ、優占種が遷移しつつあることがわかった。(図3-9参照)

底質の還元的環境(酸素が少ない環境)の緩和や、硫化水素の低減といった生育環境の改善により、底生生物が増加したものと考えられる。また、海底が石炭灰造粒物で覆われたことで、海底の基質が泥質から砂礫質になり、砂質を好む生物種が増えた<sup>9)</sup>と考えられる。人工干潟では、施工直後に日和見的な生物種が増加し、その後5～6年で、大型の長寿命種へ種組成が遷移することが知られている<sup>9)</sup>が、実証試験区内の優占種の変化もこれと類似の現象ではないかと考えている。

図3-11に底生生物への効果のイメージを示す。

地点名	月	優占種		
		第1優占種	第2優占種	第3優占種
実証試験区 (5cm区) ST.1-1	8	オコエビ	ニッコウガイ	チヨドリガイ
	12	コノハエビ	ズメ	オコエビ、ケヤクシ
実証試験区 (10cm区) ST.2-1	8	キホシウメ	オコエビ	コノハエビ
	12	フジツボ	オコエビ	コノハエビ
実証試験区 (20cm区) ST.3-1	8	オコエビ	オコエビ	コノハエビ
	12	コノハエビ	フジツボ	エダシウメ
対照区 ST.6	8	オコエビ	オコエビ	アシキウメ
	12	オコエビ	オコエビ	サシバエビ



図 3-9 2012年8月、12月の各地点の優占種

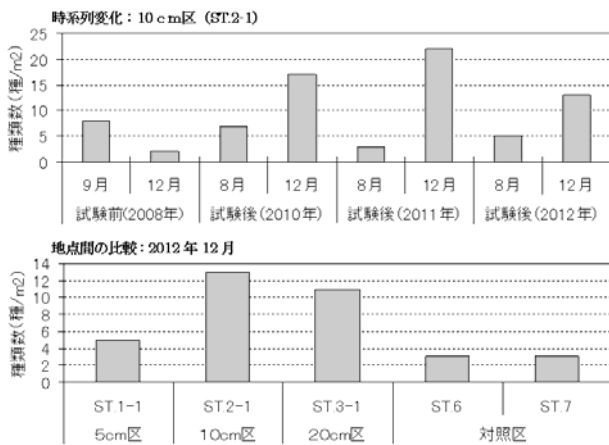


図 3-10 底生生物の種組成の変化

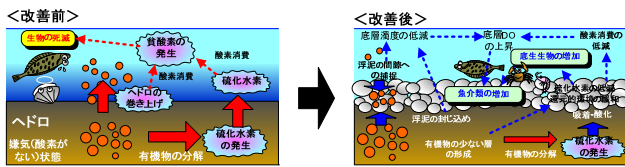


図 3-11 底生生物への効果のイメージ

#### (4) 被覆層への有機物の補足・分解および浮泥の移動抑制効果

図3-12は、石炭灰造粒物被覆層の上に堆積した浮泥の層厚の変化を示したグラフである。浮泥の堆積層厚は、夏季に増加し、冬季に減少するという変動を繰り返しながら徐々に増加している。有機物が被覆層へ捕捉されることで、被覆層表層への浮泥(有機物)の堆積が抑制されていると考えられる。

図3-13は、実証試験区内の被覆層間隙に占める浮泥体積の割合の変化を示したグラフである。「被覆層間隙に占める有機泥堆積の割合」とは、石炭灰造粒物間の隙間にどの程度の有機泥が入ったかを体積の割合として示した指標である。

被覆層間隙に占める浮泥体積の割合は、夏季に増加し、冬季には減少するという変動が見られ、層厚10cmと20cmの区域では、2012年12月時点でも間隙が保持された状態である。

被覆層内での分解促進効果により、浮泥の性状が変化し、被覆層の間隙が維持されているものと思われる。

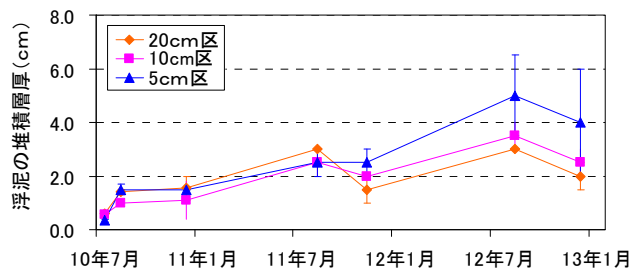


図 3-12 浮泥の堆積層厚の変化

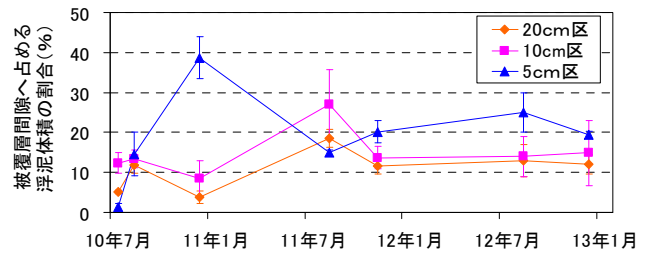


図 3-13 被覆層間隙に占める浮泥体積の割合の変化

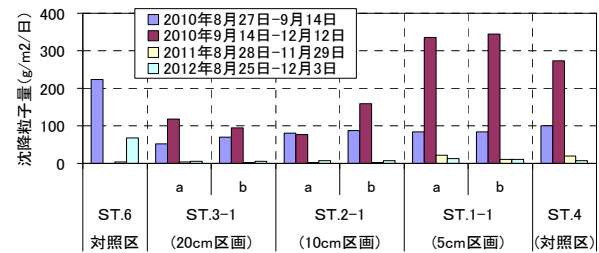


図 3-14 実証試験区周辺における沈降粒子量の変化

また、被覆層内は、海水の流動が起こりやすく、循環期には直上水と被覆層内の海水の交換が生じ、被覆層内の粒子(有機物)が移動しやすくなる。このような構造的なメカニズムも、被覆層内の間隙を維持できている要因と考えられる。

図3-14は、実証試験区と対照区の沈降粒子量の変化を示したグラフである。沈降粒子量とは、海底へ沈降してくる粒子(有機物)の量のことで、単位面積、単位時間あたりに沈降した粒子の重量として表される。

沈降粒子量については、実証試験区内では、対象区よりも低くなる傾向が見られる。このことから、浮泥の移動が抑制されていると考えられる。

一方で、2010年と2011年では、沈降粒子量が大きく異なっており、経年的な環境の違いも、浮泥の輸送や、被覆層への堆積量に影響していると考えられる。

#### 4. まとめ

海田湾という実海域での実証試験を実施し、3年間のモニタリング調査の結果から、産業系リサイクル材の石炭灰造粒物を用いた海底被覆による海域環境改善技術の効果について、検証した。

実海域での摘要事例は少なく、まだ解明されていないこともあるが、石炭灰造粒物による海底被覆には一定の海域環境改善効果があることが本研究で示された。

閉鎖性海域における貧酸素化を抑制する為には、底泥表面での酸素消費と高濁度層の発生を抑えることが重要であり、水質や底質の改善効果を持つ石炭灰造粒物で底泥を被覆することで、底泥表面での酸素消費と高濁度層の発生を抑制できることが明らかになった。

さらに、石炭灰造粒物は間隙を有した被覆層を形成で

きる為、その間隙に有機泥を捕捉して効果の継続期間を長くできることが、実証試験の沈降粒子量の測定等で確認できた。但し、効果を十分に発揮し、継続期間を持続するには、被覆層の厚さを10cm以上確保することが重要であることもわかった。

石炭灰造粒物による海底被覆は、海底泥の栄養塩や硫化水素を低減させ、海底の還元的環境の緩和といった効果をもたらし、浮泥の過剰な堆積を抑え、浮泥の巻き上げを抑える。これらの相乗効果により、底層DOが上昇する。

この様に底質や水質が改善し、良好な環境が整うことで、まずは小型の節足動物や底魚が集まり、やがて時間の経過と共に一時的に集まっていた日和見的な小型種から、大型の長寿命種に種組成が遷移し、底生生態系が回復し始めている。

本研究で目標としていた石炭灰造粒物の海底被覆による海域環境改善技術の効果継続期間は、この底生生態系を回復への軌道に乗せる迄の期間であり、その後は、生物の自浄作用にバトンタッチしてその役目を終えることを想定しており、そういった意味からも、この3年間のモニタリング調査で得られた結果は、その途中段階とはいえ、回復への軌道を着実に進んでいることを裏付けるものであった。

この技術は、閉鎖性海域の海域環境改善だけでなく、航路や泊地の水深確保の為の浚渫工事で発生する浚渫土砂を、海砂採取跡の海底窪地の再生や、干潟の再生・造成に用いる等、浚渫土砂を有効活用する場合にも適用できる技術であり、今後は、本手法の発展的活用方法について検討していきたいと考えている。

**謝辞**：本研究は、海田湾において実施された実証試験

結果を基にとりまとめた。海田湾における実証試験では、施工計画、施工、モニタリング、評価、モデルの開発と多くの検討を行い、底質改善への再生材の適用の有効性に関する科学的な知見を多く得ることができた。

これらの成果は、関係者の方々のご理解とご協力なくしては得ることのできなかつたものである。

最後に、献身的な協力と指導を頂いた広島大学 日比野忠史先生他、関係者の方々に深く御礼を申し上げる。

#### 参考文献

- 1) 中国経済産業局(2009)：閉鎖性水域の海域別調査（瀬戸内海）～最適な費用対効果の水環境改善対策の組合せ調査～報告書, p139.
- 2) 横田佳祐・橋本英資・長尾正之・高杉由夫（2006）海田湾における貧酸素水塊の変動要因. 海と空, 82, 13-21.
- 3) 株式会社エネルギア・エコ・マテリアホームページ <http://www.energia-eco-materia.co.jp/>
- 4) 環境省 平成 22 年度環境技術実証事業 閉鎖性海域における水環境改善技術実証試験結果報告書「石炭灰造粒物(Hi ビーズ)による海域環境の改善技術」
- 5) 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, 水環境学会誌 Vol.32 No.7, pp.363-368(2009).
- 6) Satoshi ASAOKA, Tamiji YAMAMOTO: Characteristics of pHosphate adsorption onto granulated coal ash in seawater, Mar. Poll. Bull., 60, 1188-1192(2010)
- 7) 平成 22 年度 広島湾奥部における技術検討会資料
- 8) 津田松苗・菊池泰二（編著）環境と指標生物 2-水界編. 昭和 54 年 1 月. 共立出版（株）, 東京.
- 9) 桑江朝比呂（2005）造成された干潟生態系の発達過程と自立安定性. 土木学会論文集, 790, 25-34.