

福山港内港地区における再生資源を活用した底質改善技術の実証と計画

Verification and Designing for Sediment Improvement Method Using Recycled Material at the
Fukuyama Inner Harbor

檜垣智	Satoshi HIGAKI	(広島県東部建設事務所港湾課)
清水直樹	Naoki SHIMIZU	(福山市経済環境局環境部環境保全課)
箕作幸治	Koji MITSUKURI	(中国地方整備局広島港湾・空港整備事務所)
三戸勇吾	Yugo MITO	(復建調査設計(株)環境部環境技術課)
樋野和俊	Kazutoshi HINO	(中国電力(株)電源事業本部)
宮田康人	Yasuhito MIYATA	(J F E スチール(株)スチール研究所)
日比野忠史	Tadashi HIBINO	(広島大学大学院工学研究院)
土田孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究院)

福山市の市街地に位置する福山港内港地区は、狭小な閉鎖性海域に合流式下水道の越流負荷が直接流入しており、海底には未処理下水を多く含んだ浮泥が厚さ1m以上に渡り堆積していた。この結果、赤潮や青潮が頻発するとともに、スカム(Scum)と呼ばれる浮泥の海面への浮遊現象が生じ、悪臭の発生や景観の悪化を起こしていた。本研究では、近年、海域環境の再生材としてその効果が実証されている2つの再生資源、すなわち石炭灰造粒物と製鋼スラグに着目し、福山港内港地区における底質改善への有効性を、小規模な実証試験により確認した。その結果を踏まえ、約10haの広範囲での底質改善計画を検討し、施工後の効果を確認した。

キーワード：底質改善，石炭灰造粒物，製鋼スラグ，有機泥，スカム（IGC：B-12，C-8）

1. はじめに

沿岸域は陸域と海域の境界に位置しているため、陸域からの負荷の影響を受けやすく、また、埋め立て等により地形が改変されており、運河等に見られるように、汚濁が集積しやすい狭小な海域が形成されている。このような海域では、海底へ有機物が堆積しやすく、底質環境が悪化しやすい。有機物を多量に含んだ底質(以下、有機泥と呼称する。)では、好気分解により酸素が枯渇し、嫌気分解が進行することで、硫化水素が発生する。さらに、嫌気分解が進行すると、メタン発酵が生じ、海面へ悪臭成分を含んだガスが放出される。これらの現象は俗にいうヘドロ臭の原因となり、周辺のアメニティを著しく低下させる。

このような悪化した底質環境を改善するためには、陸域からの流入負荷量を減ずるとともに、底質環境を改善することが必要と考えられる。従来は、底質環境の改善対策として、浚渫や覆砂といった工法が用いられてきた。しかしながら、浚渫については、浚渫した有機泥の受け入れ先を確保する必要があり、規模や周辺地域の処分場の状態によっては現実的な対策ではない。また、有機泥は、高含水比であり、その処分には脱水等の処理が必要であり、高コストとなる。覆砂については、覆砂に用いられてきた海砂の採取規制に伴い、その入手が困難になっており、海砂に替わる覆砂材の開発が

必要である。

近年、海砂といった天然資源に替わる材料として、石炭灰造粒物や鉄鋼スラグといった再生資源が注目されている。これらの再生資源は、砂とは異なる物理的・化学的特性があり、それに起因する環境改善効果を有することが報告されている¹⁻⁴⁾。例えば、石炭灰造粒物や製鋼スラグは、カルシウムを多く含み、水中で酸化カルシウムを溶出することで、pHを上昇させたり、富栄養物質であるリン濃度を低下させることが知られている¹⁻²⁾。また、これらの材料から溶出する微量元素やその酸化物は、有機物の嫌気分解に伴い発生する有害な硫化水素を酸化もしくは吸着させる効果も認められている³⁻⁴⁾。

福山市の市街地に位置する福山港内港地区(以下、内港地区)は、閉鎖性の強い海域に合流式下水道の越流負荷があり、海底には未処理下水を多く含んだ有機泥が厚さ1m以上に渡り堆積していた。この結果、赤潮や青潮が頻発するとともに、スカム(Scum)と呼ばれる有機泥の海面への浮遊現象が生じ、悪臭の発生や景観の悪化を起こしていた。しかしながら、内港地区の有機泥は、非常に高含水比・高有機物含有であり、従来の手法では高コストになるとともに、その効果についても不明確であった。

本研究では、近年、海域環境の再生材としての効果が実証されてきている2つの再生資源、すなわち石炭灰

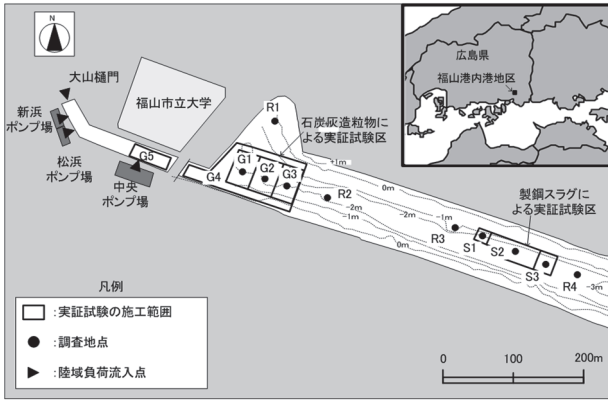


図-1 実証試験の実施箇所および調査地点



写真-1 2010年5月のスカムの大量発生状況

表-1 実証試験区の施工概要

エリア	材料	粒度範囲	層厚
G1	石炭灰造粒物	5-40mm	0.3m
G2	石炭灰造粒物	5-40mm	0.5m
G3	石炭灰造粒物	5-40mm	0.7m
G4	石炭灰造粒物	5-40mm	0.5m
G5	石炭灰造粒物	5-40mm	0.5m
S1	上：脱リンスラグ 下：脱リンスラグ	上：10-25mm 下：5-10mm	上：0.35m 下：0.35m
S2	上：脱リンスラグ 下：脱リンスラグ	上：10-30mm 下：5-10mm	上：0.35m 下：0.35m
S3	上：脱炭スラグ 下：脱リンスラグ	上：30-50mm 下：5-10mm	上：0.35m 下：0.35m

造粒物と製鋼スラグに着目し、福山港内港地区における底質改善への有効性を、小規模な実証試験により確認した。その後、両再生資源の特性と内港地区の基盤環境を踏まえた上で、内港地区全域を改善するための底質改善計画を検討した。さらに、検討した海域環境改善方策を踏まえ、石炭灰造粒物と製鋼スラグを用いて、約10haの広範囲での底質改善を実施し、その効果を確認した。

2. 内港地区における底質改善事業の経緯と概要

福山港内港地区の周辺は、福山市の地域中核拠点地区に指定されており、新都市ゾーンとして商業機能や文化機能を集積し、アメニティの高いウォーターフロント空間の創出を図ることが計画されている。その一環として、2011年4月には、内港地区奥部の地先へ福山市立大学の開校が予定され、スカムや悪臭に対する早急な対策が望まれていた。このような背景の中、福山市は、国土交通省中国地方整備局、広島県に、内港地区の早急な改善に対する協力を要請し、2011年1月に検討委員会を設立した（以下、検討委員会）。また、広島大学においても内港地区の環境改善のための研究会が、2012年2月に設立した（以下、研究会）。検討委員会で

は、内港地区最奥部における底質改善のため石炭灰造粒物を用いた実証試験を、研究会では内港地区中央部における底質改善のため製鋼スラグを用いた実証試験を、それぞれ2011年4月および7月から開始した。それぞれの実証試験区における底質改善の実施箇所と施工概要は、図-1および表-1に示すとおりである。実証試験は約3年の期間実施され、それぞれの結果を踏まえた海域環境改善方策を2014年3月に策定し、2014年8月からは、広範囲での本格的な底質改善事業を実施した。2016年5月現在においても、継続的にモニタリングを実施し、その効果を検証している。

3. 内港地区の環境の特徴

3.1 下水からの流入負荷量と削減計画

福山港内港地区では、湾奥の放水路へ、新浜ポンプ場、中央ポンプ場、大山樋門、松浜ポンプ場からの流入負荷がある（図-1）。合流式下水道からの越流負荷は、新浜ポンプ場、中央ポンプ場から生じている。実証試験開始以前の2010年時点で、新浜ポンプ場からの越流負荷は、年間230ton-BOD/年程度であった。この値を基に、内港地区への単位容積あたりのBOD負荷量を概算すると、770g-BOD/m³/年となる。近接した閉鎖性内湾である広島湾の単位容積あたりのCOD発生負荷量は2.19g-COD/m³/年⁵⁾であることから、内港地区における、合流式下水道からの越流負荷のインパクトが非常に大きいことが分かる。なお、大山樋門、松浜ポンプ場からは河川水が流入しているが、合流式下水道からの越流負荷に対して、1割以下の負荷量しかなく、汚濁負荷源としては重要ではない。

福山市では、合流式下水道からの越流負荷削減のため、下水道の整備事業を進めており、2014年4月からは雨水滞水池を供用開始した。雨水滞水池では、越流負荷する下水を、一旦、滞水池へ貯留し、高速ろ過によりBOD濃度を低下させた後に放流する。これにより、合流式下水道からのBOD負荷量は、雨水滞水池供用開始

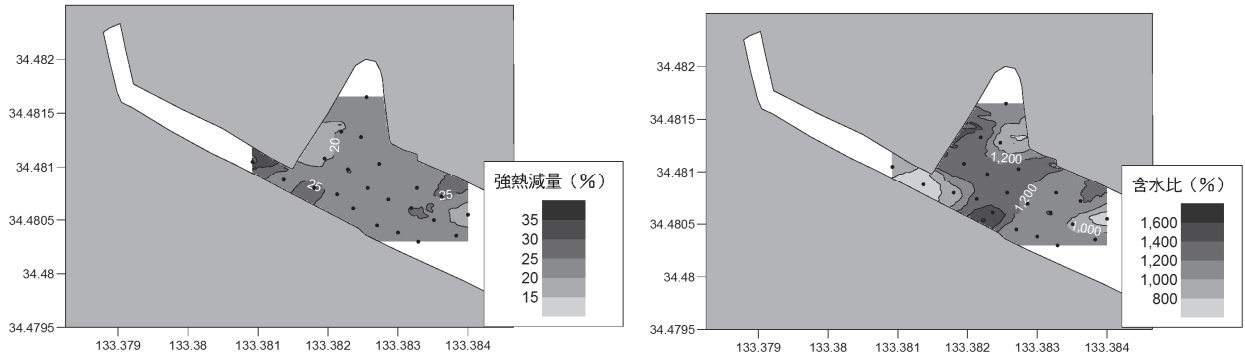


図-2 2010年11月の底泥（0-10cm）の強熱減量（左）及び含水比（右）の平面分布

前の4割から5割程度にまで減少している。

3.2 実証試験開始以前の内港地区の環境

実証試験開始前の福山港内港地区では、例年、春季にスカムの発生が確認されていた。特に、2008年5月および2010年5月には、海面全体をスカムが覆うスカムの大量発生が生じ、社会的にも問題となっていた(写真-1)。また、青潮については、特に秋季から冬季の循環期に頻繁に確認されており、有機泥の嫌気分解に伴い大量の硫化水素が蓄積されていることを示唆していた。

実証試験を開始する前の2010年11月に実施した現況調査結果より、内港地区では湾奥部ほど水・底質の状況が悪化しており、溶存酸素は、表層でも4mg/L程度、下層では2mg/Lを下回る状況であった。また、底質については、放水路から200mほど下流の範囲が最も悪化しており、含水比は1500%、強熱減量は25%を超える有機汚濁が著しく進行した有機泥が堆積していた(図-2)。これらの範囲では、嫌気分解が進行し、メタン発酵が生じることで、海底から海面へ発泡現象が生じることが確認されていた。スカムはこれらの気泡が有機泥に浮力を与えることで生じることも室内試験から示され⁶⁾、スカムの発生源として湾奥の汚濁範囲が重要であると考えられた。

4. 石炭灰造粒物による底質改善実証試験

4.1 石炭灰造粒物の特徴

石炭灰造粒物は、火力発電で出た石炭灰(フライアッシュ)をセメントで造粒固化した材料である。粒径の範囲は5-40mm、中央粒径が20mm前後の礫質であり、比重が2.1g/cm³と軽く、軟弱な底質に散布しても沈み込みにくいという物理的特性を持つ。また、酸化カルシウムや酸化マグネシウムを多く含み、pHの上昇や、リンの吸着効果、硫化水素の吸着・酸化といった化学的な効果を持つ^{1,3)}。また、礫質であるため、石炭灰造粒物層に沈降してきた有機物は、石炭灰造粒物間の隙間(間隙)

に補足され、礫間接触の効果により有機物分解の促進がされる⁷⁾。このような物理的・化学的な特徴により、有機物の負荷が大きく、有機汚濁の著しい内港地区奥部の底質改善には、石炭灰造粒物が最適であると考えられた。

4.2 石炭灰造粒物による実証試験の概要

石炭灰造粒物による底質改善の実証試験は、景観悪化や悪臭の主要因となっているスカムの抑制に焦点を当てており、スカムの発生源となっている可能性が高い湾奥部の約1haで実施した(図-1)。底質改善のために材料を散布する厚み(層厚)は、航路水深確保や効果を得るため0.3mから0.7mで設計した。実証試験区的设计の詳細については、日比野ら⁸⁾を参照されたい。

施工は、2011年3月から4月にかけて実施され、グラブバケットを搭載した起重機船により、石炭灰造粒物の散布が行われた。この際、計画の層厚を散布できるように予め、陸上で散布量の確認試験を行った。

施工完了後、実証試験区の効果を検証するため、眺望点(福山市立大学の屋上)からの15分間隔での写真の連続撮影によるスカム発生状況の確認や、図-1に示す実証試験区の地点(G1,G2,G3)および対照地点(S1,S2)で、石炭灰造粒物層上への浮泥の堆積量の測定、間隙水中の硫化水素濃度の分析等を行った。

4.3 石炭灰造粒物による実証試験の主要な結果

実証試験開始後のスカムの発生状況を把握するため、眺望点にカメラを固定し、内港地区におけるスカムの発生状況を15分間隔で撮影した。眺望点の画像を基に、スカムの発生が無い状態をレベル0、僅かにスカムが見られた状態をレベル1、局所的にスカムがある場合をレベル2、部分的なエリアでスカムがある場合をレベル3、広範囲に渡りスカムがある場合をレベル4、海面全体がスカムに覆われる状態をレベル5(写真-1の状態)と定義し、各日の最大レベルを整理した。また、定期的に実証試験区(G1,G2,G3)において、潜水士により、浮泥の堆積量や地盤高、底質等の調査を行った。

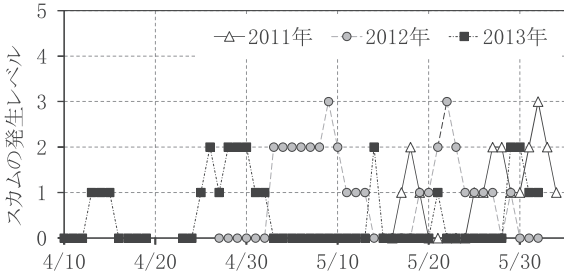


図-3 実証試験期間中の春季のスカムの発生状況

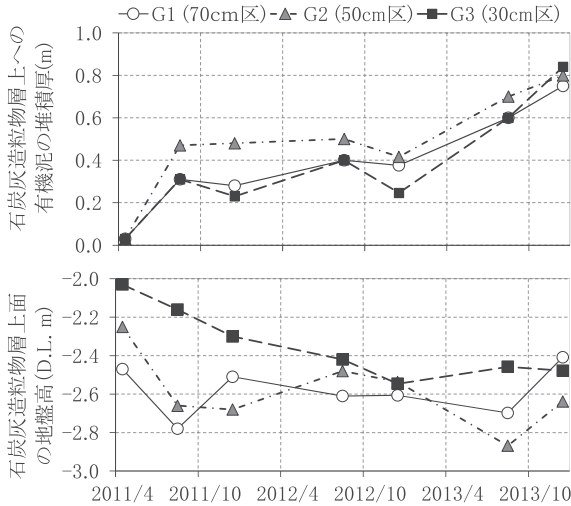


図-4 石炭灰造粒物層上への有機泥の堆積量，石炭灰造粒物層上面の地盤高の変化

実証試験開始以降の春季におけるスカムの発生レベルを図-3に示した。例年、内港地区におけるスカムの発生は主に春季（4～5月）の大潮時に生じていた。石炭灰造粒物の実証試験開始以降、春季のスカムの大量発生は確認されておらず、湾奥部の最も汚濁の進んだ範囲の底質改善を行ったことによる効果と考えられた。

一方で、実証試験開始から約3ヶ月後の調査では、石炭灰造粒物層の上に厚さ40cm程度の有機泥層が形成され、時間の経過とともに徐々に増加していった（図-4）。石炭灰造粒物層上の有機泥層厚の増加は、石炭灰造粒物層上面の地盤高の沈下に伴い生じており（図-4）、実証試験区の沈下に伴い周辺の有機泥が実証試験区上へ流れ込むことで急激な有機泥の堆積が生じたものと考えられた。

石炭灰造粒物層の急激な沈下が生じた原因を推定するため、Cc法を用いた検証を行った。実証試験区周辺のボーリング結果より、地盤面から2mは軟弱な有機泥層が存在し、その下は砂混じりシルトとなっていると仮定した。現地で採取した有機泥の圧密試験結果より、有機泥層の圧縮指数を1.81とし、圧密係数は $30\text{cm}^2/\text{day}$ とした。なお、圧密試験は現地底泥を試験室へ持ち帰り、静置させ、含水比を300%程度に調整した後に、段階載

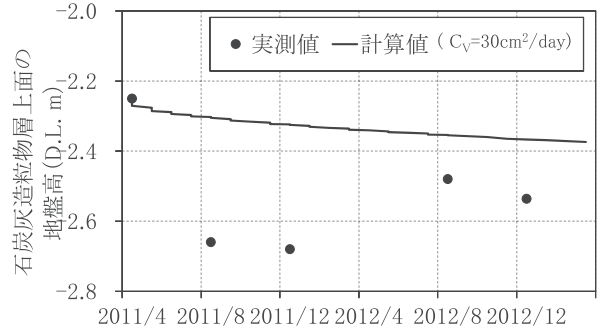


図-5 Cc法による実証試験区（G2）の沈下状況の再現計算結果

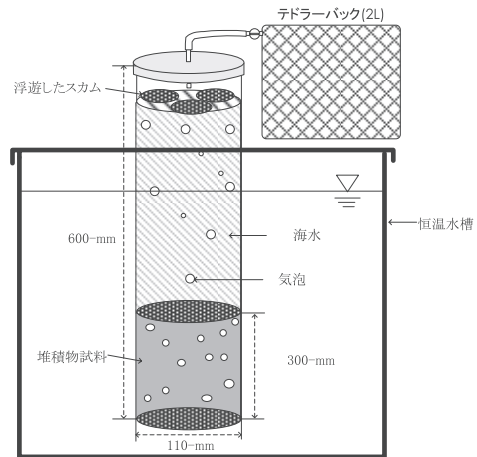


図-6 スカムの発生ポテンシャルの確認試験の概要

荷法により行っている。計算結果を図-5に示す。実証試験で見られた石炭灰造粒物層の急激な沈下は、正規圧密を仮定したCc法では再現できなかった。このことから、局所的に狭い範囲で試験区を施工したために、石炭灰造粒物層の下層にある軟弱層の変形が生じ、即時沈下が生じていたと考えられた。

このような有機泥の急激な堆積に伴い、間隙水中の硫化水素濃度は、実証試験区（G1,G2,G3）と対照区（S1,S2）の差が不明確となっており、石炭灰造粒物による底質改善効果が減衰していることが懸念された⁹⁾。そこで、室内実験により、石炭灰造粒物層上へ堆積した有機泥から、スカムが発生する可能性を検証した。実験は、2013年9月に実施し、実証試験区のG2エリア上へ堆積した有機泥を柱状採泥し、試験室へ持ち帰った。柱状採泥試料はテドラーパックを取り付けた蓋で密閉し、現場水温で約1週間培養した（図-6）。その後、テドラーパックへ捕集されたガス容量からガスの発生量を、柱状採泥試料の海水面上へ浮遊しているスカムの重量からスカムの発生ポテンシャルを計測した。さらに、発生したガス中の硫化水素濃度を検値管法により計測した。実験は、有機泥のみのケース（G2）と、有機泥の上へ石炭灰造粒物を20cm覆砂したケース（G2'）の2ケースで実施した。

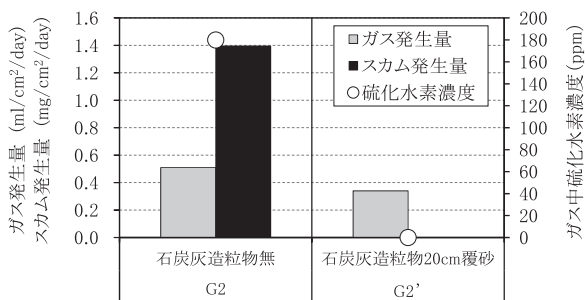


図-7 スカムの発生ポテンシャルの確認試験結果

実験結果を図-7に示す。ケース G2 では、スカムの発生が確認され、石炭灰造粒物へ有機泥が大量に堆積すると、再びスカムの発生源となることを示していた。一方で、ケース G2'では、ガスの発生は見られたが、スカムの発生は見られず、有機泥表面を物理的に押さえ込めていれば、スカムは発生しないことが証明された。また、石炭灰造粒物を覆砂していない試料のガスからは高濃度の硫化水素が検出されたが、覆砂した試料のガスからは検出されなかった(図-7)。柱状採泥試料を観察したところ、ケース G2'では有機泥から発生したガスは石炭灰造粒物層へ一旦トラップされてから放出されており、石炭灰造粒物による硫化水素の吸着や酸化効果により、ガス中の硫化水素濃度は低減したものと考えられた。

以上のような結果より、内港地区におけるスカムおよび悪臭の抑制には、石炭灰造粒物による底質改善(覆砂)が有効であると考えられた。一方で、その効果を継続させるためには、石炭灰造粒物層のめり込みと即時沈下を極力低減し、石炭灰造粒物層上への浮泥の堆積を最小限とすることが必要であることも示された。

5. 製鋼スラグによる底質改善実証試験

5.1 製鋼スラグの特徴

製鋼スラグは、鉄の製鋼工程で発生する副産物である¹⁰⁾。製鋼スラグにはその発生過程により幾つかの種類があり、今回の実証試験で用いたのは、転炉系製鋼スラグである脱リンスラグと脱炭スラグである。転炉系スラグは、酸化カルシウムおよび鉄分を多く含むため、pHの上昇や、リンの吸着効果、硫化水素の硫化鉄への固定や酸化といった化学的な効果を持つ^{2,4)}。また、比重は3.2g/cm³前後と通常の砂(2.6g/cm³)よりも若干重い。粒径は状況に応じて調整可能であり、今回の実証試験では、粒径5~10mmの脱リンスラグ、粒径10~30mmの脱炭スラグおよび脱炭スラグを用いた¹¹⁾。

5.2 製鋼スラグによる実証試験の概要¹⁰⁾

製鋼スラグによる底質改善の実証試験は、ほぼ無生

物状態となっている内港地区の底泥環境の改善と、生態系の再生に焦点をあて、内港地区奥部よりは底質の有機汚濁の程度が低い内港地区中央部にて実施した(図-1)。2011年8月にエリアS1(0.04ha)を、2012年7月にエリアS2およびS3(0.35ha)を施工した。石炭灰造粒物の実証試験区と同様にバケット工法にて施工した。なお、製鋼スラグは、比重が重く、施工時に有機泥への材料のめり込み量(=材料の損失量)が大きくなる懸念されたため、下層にはめり込み量が少なくなる細粒分を散布し、その後、上層に粗粒分の製鋼スラグを散布した。上層の製鋼スラグを粗粒分としたのは、石炭灰造粒物で示されているような浮泥の捕捉・分解効果⁷⁾を期待したためである。

施工完了後、定期的に図-1に示す実証試験区(S1, S2, S3)および対照区(R3, R4)にて潜水土により底質間隙水を採取し、硫化水素濃度、酸化還元電位および溶存酸素濃度の水質測定を行った。さらに冬季(2013年2月)には水中観察および底生生物の同定を行った。

5.3 製鋼スラグによる実証試験の主要な結果¹¹⁾

スラグ区および対照区の底質間隙水中の溶存硫化物濃度の測定結果を図-8(a)に示す。対照区では60~400mg S/Lと高濃度の溶存硫化物が検知されたのに対し、スラグ試験区では検出限界~20mg/Lで推移しており、全ての測定において、溶存硫化物濃度は顕著に低位であった。酸化還元電位(図-8(b))はスラグ施工区では-20~+100mVと対照区(-200mV前後)と比較して高位で推移した。溶存酸素濃度(図-8(c))は、秋季から冬季にかけて、試験区で対照区よりも高い傾向が見られた。このように、スラグ施工部位の底質において、溶存硫化物抑制および酸化雰囲気での改質が顕著に認

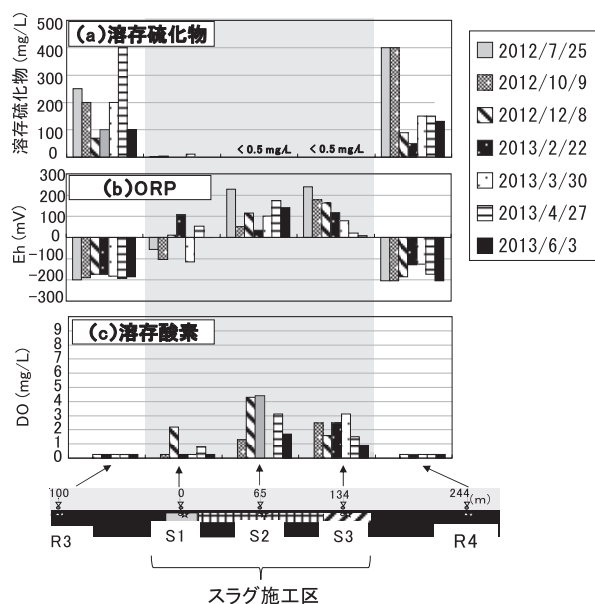


図-8 底質間隙水の水質測定結果¹¹⁾

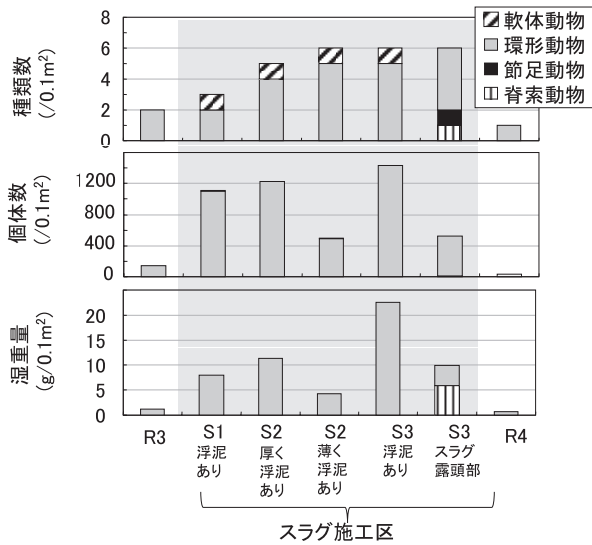


図-9 底生生物の同定結果 (2013年2月) ¹¹⁾

められ、その効果は試験期間中継続した。

2013年2月には、底生生物が着生した。底生生物の種類数、個体数および湿重量の測定結果を図-9に示す。スラグ試験区においては、環形動物や軟体動物など3～6種が確認された。一方、対照区においては環形動物が1～2種に限られた。水中観察写真を写真-2に示す。スラグ試験区(S3付近)ではユウレイボヤやスピオがスラグ表面に付着していた。これは、上述のようにスラグ

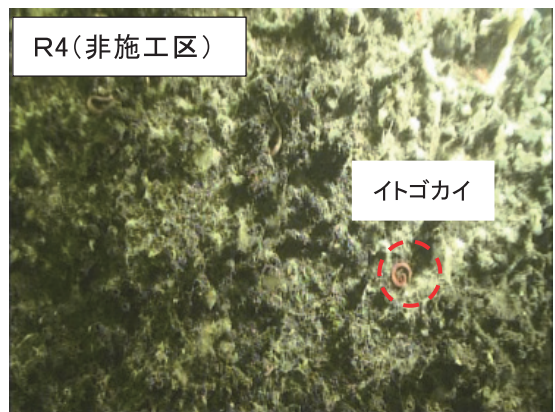
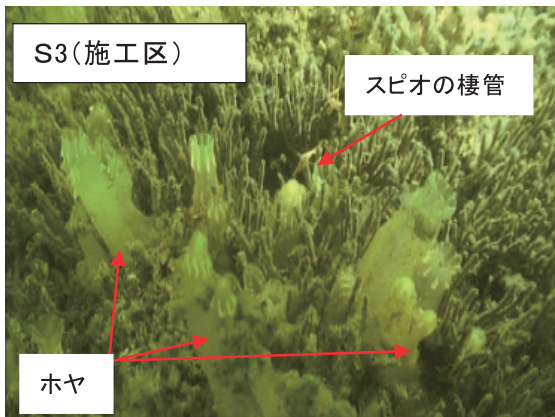


写真-2 製鋼スラグ施工区(S3付近)と非施工区(R4付近)の水中観察状況 (2013年2月) ¹¹⁾

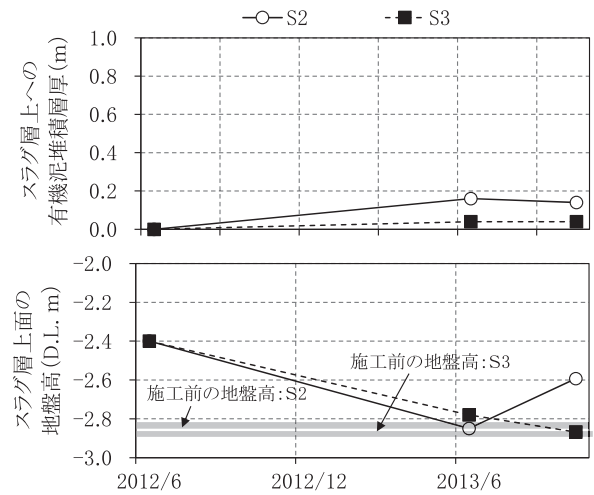


図-10 製鋼スラグ層上への有機泥の堆積量、製鋼スラグ層上面の地盤高の変化

試験区において間隙水の溶存酸素濃度が増大したこと、および冬季に浮泥の堆積厚みが減少し、スラグ表面が露出する部位が生じたため、とくに、ユウレイボヤやスピオのように礫に付着して生息する底生生物に好適な環境が形成されたためと考えられた。ユウレイボヤは、海水をろ過して懸濁物質を除去するはたらきを有するろ過摂食者の一種であることが知られている ¹²⁾。

以上のように、内港地区中央部では、製鋼スラグによる底質改善により、底質環境の改善とそれに伴う生態系の再生が可能であることが示された。一方で、スラグ層上への有機泥の堆積や試験区の沈下は、製鋼スラグの実証試験区でも見られた(図-10)。しかしながら、試験区の沈下量は0.2m程度と石炭灰造粒物の区画よりも小さく、施工以前の地盤高に戻っており、航路水深確保の観点からは、むしろ望ましい地盤高となっていた。また、表層への浮泥の堆積量は0.05～0.15m程度と少なく、前述のとおり、下流側に位置するS3では、地形の凸部ではスラグが表面に露出し、生物が着生していた(写真-2)。これらの結果から、沈下量を少なく保つことができれば、浮泥の堆積量は減少し、底質改善効果を維持できることが示唆された。

6. 再生資源を用いた底質改善の計画と施工

6.1 底質改善計画の目標

石炭灰造粒物および製鋼スラグによるそれぞれの実証試験結果をもとに、内港地区における底質環境を改善するための事業計画を検討した。計画を検討するにあたり、目標を整理した。まず、内港地区で最も問題となっているスカムの発生および悪臭を、現状(2013年)以下とすることを第一義的な目標とした。一方で、合流

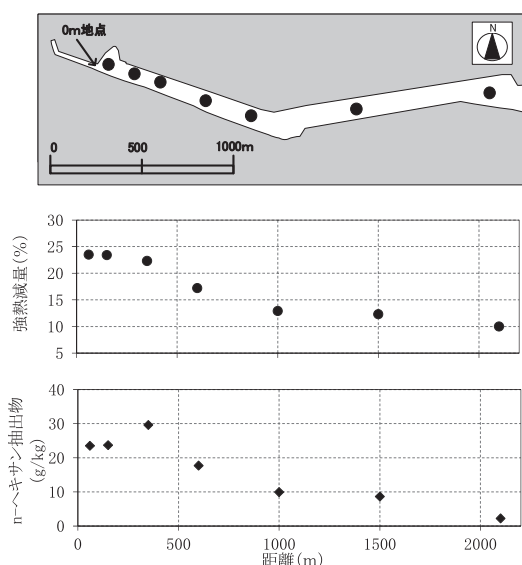


図-11 内港地区における強熱減量およびn-ヘキサン抽出物の空間的な分布

式下水道からの越流負荷は、雨水滞水池の供用開始後も4割程度は継続して生じること、元来、内港地区は閉鎖性が強く、海水の交換が悪く、富栄養化が進行しやすい海域であることを勘案し、将来的には、生態系を再生し、生物による自浄能力を高めることも視野に入れた。

6.2 底質改善の実施範囲

底質改善の実施範囲を検討するため、内港地区から福山港全域における底質の空間的な分布を2013年7月に調査した。代表的な調査結果として、強熱減量とn-ヘキサン抽出物の結果を図-11に示した。強熱減量とn-ヘキサン抽出物は下水道から負荷される未処理下水の影響範囲を特定する上で良い指標となる。これらの指標は、湾奥で最も高く、その下流1km程度の間で急激に減少していた。また、放流口から1km程度までの範囲では底生生物はほとんど見られていないことから、この範囲を底質改善の実施候補地とした。

また、定点カメラからの観察により、スカムが確認されている放流口から400m程度まで下流の範囲をA工区とし、スカムおよび悪臭の抑制のために優先的に底質改善を実施すべきエリアとした。また、A工区よりも下流のB工区については、生物の着生が期待できることから、生態系再生による水質浄化能力の強化エリアとした。

さらに、石炭灰造粒物の試験結果より、内港地区奥部の軟弱な地盤へ局所的に加重がかかると即時沈下が生じることが示されたことから、横断方向には、護岸の端から、対岸の護岸の端まで施工を行い、極力、軟弱な地盤層全体へ等しく過重を掛けることで、即時沈下を抑制し、大量の有機泥の堆積を防止する計画とした。

6.3 軟弱な地盤における効果的な底質改善工法

内港地区奥部の軟弱な地盤では、材料のめり込み量も大きくなる。特に、バケット工法により、石炭灰造粒物を散布した場合、海水中を落下する過程で分級が生じ、粗粒径の石炭灰造粒物から海底面に衝突するため、めり込み量が想定よりも大きくなるのが室内試験から確認されている⁹⁾。また、バケット工法によって形成される粗粒分が下層にくる物理構造は、有機泥からの硫化水素等の溶出に対するキャッピング効果も低くなるため、キャッピング効果を高めるためには、これと逆の物理構造を有することが望ましい⁹⁾。このような点から、施工方法については、材料のめり込みによる損失を極力減らし、強いキャッピング効果を得るため、1層目には細粒分、2層目には粗粒分を撒く、粒度調整2度撒き工法を適用した⁹⁾。なお、スラグの実証試験区では、当初より、この工法で施工を行っており、間隙水中の硫化水素の抑制効果等が良好に得られている(図-8)。

6.4 航路水深を阻害しない使用材料と散布層厚の設計

内港地区の底質改善に使用する材料と散布層厚の設計は、大きく二つの視点から検討を行った。一つ目の視点は、内港の底泥に対して十分な底質改善効果を発揮できる層厚を確保することである。この点について、石炭灰造粒物の試験区は、0.3mから0.7mの間で段階的に層厚を変えて検証したものの、試験区の沈下により区画間の差が明確になっていない。一方で、スラグの試験区については、上層0.35m、下層0.35m、計0.7mの散布を行い、良好な結果が得られている。以上のような点を踏まえ、ここでは、底質改善効果を得るのに重要となるのは、全層厚というよりは、めり込みが生じていない層厚と考え、スラグの試験区の上層0.35m以上の非めり込み層厚を有することを底質改善効果が得られる条件として設定した。

二つ目の視点は、内港地区の航路としての水深を確保することである。内港地区は、泊地として利用されており、また、気象擾乱時の避難港としても機能する。このため、航路として最低水深2mを確保する必要がある。また、水深が2m未満の箇所では航路水深を現状以下としないことが制約条件となる。両実証試験で示されたとおり、内港地区のような軟弱な地盤を有する海域で覆砂を行った場合、施工時のめり込みおよびその後の覆砂層の沈下により、水深が施工前から変化しない、もしくは、より深くなることもある。この性質を利用し、航路水深を阻害することなく底質改善が可能な層厚を以下の式から求めた。

$$T_{i,j} = V_{i,j} + S_{i,j} + D_i \quad (1)$$

ここで、添え字の*i*は対象エリアを、*j*は使用材料を示し、 $T_{i,j}$ は最大散布可能層厚(m)、 $V_{i,j}$ はめり込みによる損失量(m)、 $S_{i,j}$ は材料*j*を $T_{i,j}$ 散布した際の沈下量(m)、 D_i は許容される水深の変化量(m)である。

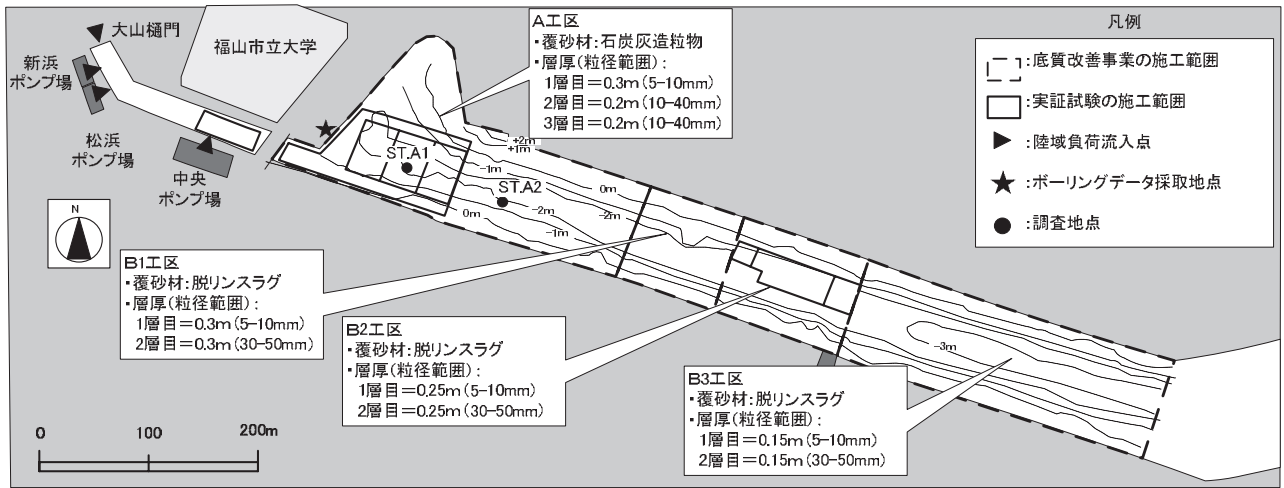


図-12 内港地区における底質改善の実施箇所と使用材料および施工層厚の検討結果

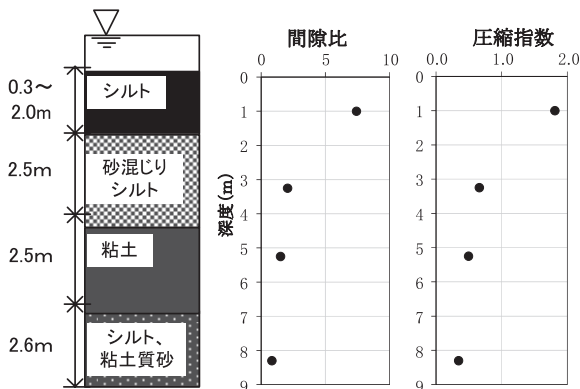


図-13 圧密沈下算定のための地盤条件

$V_{i,j}$ については、2013年7月に現地調査を行い、簡易めり込み量測定装置¹³⁾を用いて、石炭灰造粒物および製鋼スラグの細粒分(最大粒径10mm以下)を使用した場合のめり込み量を予測した。なお、バケット工法で施工を行う場合、大粒径の材料が先に海底に衝突することから、使用材料の D_{90} の粒径および重量をめり込み量の予測に用いた。

S_i は、内港地区の全域を覆砂する場合には、実証試験時とは異なり即時沈下は生じないと考え、Cc法により求めた。

$$S_i = \frac{Cc}{1+e_i} \cdot (H_i - V_{i,j}) \cdot \log_{10} \frac{1+\Delta P_{i,j}}{\sigma'} \quad (2)$$

$$\Delta P_{i,j} = T_{i,j} \cdot \gamma'_j \quad (3)$$

ここで、Ccは圧縮指数、 e_i は間隙比、 H_i は粘土層厚(m)、 ΔP_i は覆砂による荷重圧(kN/m²)、 σ' は粘土層中心での有効応力(kN/m²)、 γ'_j は使用材料jの水中での単位体積重量(kN/m³)であり、石炭灰造粒物は8.41kN/m³、製鋼スラグは14.4kN/m³とした。 S_i の算定のための地盤条件は、図-12に示す位置のボーリングデータを

表-2 各エリアにおける材料毎の散布厚の解析結果

エリア	石炭灰造粒物			製鋼スラグ		
	$T_{i,G}$	$V_{i,G}$	$S_{i,G}$	$T_{i,S}$	$V_{i,S}$	$S_{i,S}$
A	0.65	0.25	0.40	0.99	0.30	0.69
B1	0.41	0.15	0.26	0.67	0.20	0.47
B2	0.32	0.12	0.20	0.54	0.18	0.36
B3	0.12	0.05	0.07	0.27	0.10	0.17

基に、図-13のとおり設定した。ここで、各種パラメータは実測値を基に設定したものである。また、2013年7月に、底質調査を行うとともに、船上より塩ビパイプを貫入させ、おおよそのシルト層厚の空間的な分布を推定した。

式(1)から式(3)を満たす T_i について、数値解を求め、 $S_i > 0.35m$ となる条件が得られるように使用材料と散布厚の検討を行った。検討にあたり、底質調査結果をもとに、B工区については、さらにB1~B3へと3分割した。

各区のシルト層厚は、A工区で2.0m、B1工区で1.0m、B2工区で0.6m、B3工区で0.3mと設定した。 D_i については、全ての工区で0mと設定した。

使用材料毎の散布層厚の計算結果を表-2に示す。A工区については地盤が非常に軟弱であるため、製鋼スラグでは施工時のめり込み量(V_i)や沈下量(S_i)が非常に大きくなり、軽量な材料である石炭灰造粒物の方が適していると考えられた。一方で、シルト層厚の薄いB1~B3工区については、軽量な石炭灰造粒物では、 $S_i > 0.35m$ の条件を満たさなかった。一方で、製鋼スラグは、B1~B2工区では、 $S_i > 0.35m$ の条件を満たしており、 S_i を0.35m以上確保できる高比重の製鋼スラグが適した材料であると考えられた。B3工区については、製鋼スラグを用いても $S_i > 0.35m$ の条件はクリアできないものの、有機汚濁の程度は、製鋼スラグの実証試験区よりも低く(図-11)、 S_i が0.2m程度でも十分な効果が得られると考えた。

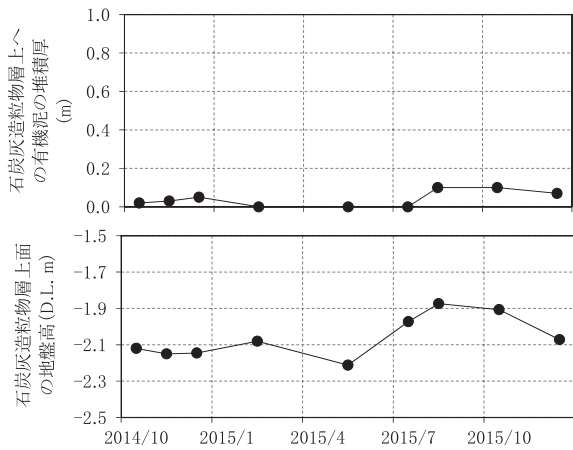


図-14 A工区 (ST.A1) への有機泥の堆積量, 石炭灰造粒物層上面の地盤高の変化

以上の検討結果を踏まえ、内港地区における底質改善の使用材料と散布層厚を図-12のとおり設定した。なお、A工区については、最大で0.7mの層厚で施工を行うが、圧密沈下の解析に用いたパラメータ等、不確かな部分が多いため、まずは1層目(0.3m)と2層目(0.2m)の計0.5mの層厚を施工し、地盤の沈下状況を確認した後に、状況に合わせて3層目(0.2m)を施工する計画とした。

6.5 底質改善の施工と効果の確認

以上の底質改善計画に従い、2014年8月から2016年3月にかけて、A工区およびB工区の覆砂工を粒度調整2度撒き工法により実施した。まず、2014年8月から2014年10月に、スカムおよび悪臭の抑制のために必要となるA工区の最奥部の約3ha(図-12中のSt.A2付近まで)を施工した。続いて、2015年8月から2016年3月にかけてA工区に残りのエリアおよびB1工区からB3工区までの施工を行った。今後、A工区の圧密沈下に伴う航路水深の変化を踏まえながら、A工区の3層目の施工を検討する予定である。

A工区の最奥部の施工から約1年半の間、施工区の明確な沈下および有機泥の堆積は確認されていない(図-14)。これは、計画時に検討したとおり、横断方向を護岸際まで施工することで、地盤の変形が生じにくくなったこと、周辺汚濁域の全体を覆砂することで、周辺から流入してくる有機泥が無くなったことによると考えられる。

また、A工区の最奥部の施工後、内港地区ではスカムの発生は確認されておらず、悪臭レベルを示す臭気指数も検出下限以下まで低下しており、計画時に設定した目標は達成されている。さらに、A工区の最奥部の施工から約1年後の2015年12月には、アメフラシ等の大型生物が着生していることも確認されており(写真-3)、底質環境は大きく改善されている。B工区については、現時点で施工から半年程度しか経過しておらず、生態系の再生に関するデータが十分には無いもの



写真-3 2015年12月にA工区で確認されたフレリトゲアメフラシ(上)及びB工区の干潟場における藻類の繁茂状況(下)

の、岸壁付近の浅場では、アオノリの繁茂や、鳥類(カモ類等)の飛来も確認されている。

7. 結論

本研究では、スカムや悪臭の発生が社会問題となっていた福山港内港地区で、再生資源を覆砂材として用いる底質改善技術に関する実証試験を行い、その結果を踏まえ、内港地区全域の底質改善計画を検討し、施工を行った。研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 内港地区奥部で実施した石炭灰造粒物による実証試験により、軟弱な地盤上へ局所的に覆砂を行うと、覆砂層の即時沈下が生じるため、周辺の有機泥が覆砂層上へ堆積し、底質改善効果が減少することが示された。
- (2) 内港地区中央部で実施した製鋼スラグによる実証試験により、覆砂上への顕著な有機泥の堆積がなければ、間隙水中の硫化水素濃度が大幅に低下し、生物が着生する環境へと再生できることが示された。
- (3) 航路水深を阻害せずに覆砂を行うための材料と

覆砂層の検討方法を考案し、地盤が非常に軟弱な内港地区奥部では軽量の石炭灰造粒物が、地盤が比較的締まっている内港地区中央部では高比重の製鋼スラグが適していることを示した。

- (4) 内港地区全域を対象とした石炭灰造粒物および製鋼スラグによる覆砂により、スカム・悪臭の抑制の効果が明確に得られた。また、底生生物等の着生が見られた。
- (5) 即時沈下とそれに伴う過剰な有機泥の堆積は、汚濁範囲の全域へ覆砂を行うことで低減できることが示された。

今後、立案した計画を基に、残りの底質改善工事を実施するとともに、モニタリングを継続し、再生資源による底質改善効果の持続性や、生態系の再生プロセスについて検証を進めていくことが重要である。

謝辞

本研究の実施にあたり、福山港内港地区の海域環境改善方策に係る検討委員会の日本大学教授細川恭史委員、横浜国立大学教授中村由行委員、鉄鋼スラグを活用した福山内港地区水域環境改善研究会の放送大学教授岡田光正委員、広島大学教授山本民次委員、広島大学教授西嶋渉委員を始めとする委員の方々にご指導とご助言を賜った。記して御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 浅岡聡, 山本民次, 山本杏子: 石炭灰造粒物を用いた沿岸底質環境改善材開発のための基礎的研究～栄養塩溶出試験および *Skeletonema costatum* の増殖試験～, 水環境学会誌, Vol.32, No.8, pp.455-462, 2008.
- 2) 伊藤一明, 西嶋渉, 正藤英司, 岡田光正: 鉄鋼スラグ散布による沿岸海域でのリン除去の基礎的研究ー室内実験と長期現場実験ー, 水環境学会誌, Vol.19, No.6, pp.501-507, 1996.
- 3) S.Asaka, S.Hayakawa, KH.Kim, K.Takeda, M.Katayama and T.Yamamoto: Combined adsorption and oxidation mechanisms of hydrogen sulfide on granulated coal ash, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 377, pp284-290, 2012.
- 4) 林明夫, 浅岡聡, 渡辺哲哉, 金子諒子, 高橋克則, 宮田康人, Kyunghoi Kim, 山本民次, 井上亮, 有山達郎: 製鋼スラグによる海水中の硫化物イオンの低減機構, *鉄と鋼*, Vol.98, No.11, pp.618-625, 2012.
- 5) 広島湾再生推進会議: 広島湾再生行動計画, 平成19年3月.
- 6) 田辺弘雄・岩本幸生・清水直樹・三戸勇吾・米原吉彦・吉岡一郎・斉藤直・日比野忠史: ヘドロ化した内湾でのスカム発生機構の解明と石炭灰造粒物を用いた底泥浄化法の設計, 土木学会中国支部会 研究発表会概要集, 36, 2011.
- 7) 玉井和久, 小畑健二, 芳倉勝治, 日比野忠史, 首藤啓, 山本裕規, 三戸勇吾: 石炭灰造粒物の海底被覆による中・長期的な海域環境改善効果, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No.2, pp. I_892-I_897, 2013.
- 8) 濱田泰広, 田辺弘雄, 清水直樹, 吉岡 一郎, 三戸勇吾, 齊藤直, 日比野忠史: スカムが発生する内港での底質環境の改善法の設計と施工, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No.2, pp. I_1151-I_1156, 2012.
- 9) 正田武, 卜部憲登, 平田正浩, 三戸勇吾, 中本健二, 日比野忠史: 過栄養な内港域における再生資源を用いた底質改善手法の提案, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp. I_880-I_885, 2015.
- 10) 環境資材鉄鋼スラグ, 鉄鋼スラグ協会, 東京, (2010) .
- 11) 宮田 康人, 林 明夫, 桑山 道弘, 山本 民次, 谷敷多穂, 卜部 憲登, 製鋼スラグによる底泥中硫化水素抑制の実海域試験, *鉄と鋼*, Vol. 100 (2014) No. 11 p. 1426-1432 2002.
- 12) 中井智司, 奥田哲士, 西嶋 渉: ヌウレイボヤ (*Ciona savignyi*)の海水ろ過能力の評価, 化学工学会 第45回秋季大会, 岡山, 1041, 2013.
- 13) 三戸勇吾, 高濱繁盛, 山本裕規, 菅野孝則, 日比野忠史: 水底覆砂のめり込み量の測定方法, 特許第 5597182 号, 2014.

(2016年6月20日 受付)