

へ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

広島県土木局 田辺弘雄, 広島大学工学部 岩本幸生

福山市経済環境局 清水直樹, 復建調査設計 三戸勇吾

広島港湾空港整備事務所 出路康夫, 中国電力 吉岡一郎

エネルギー・エコ・マテリア 斉藤直, 広島大学 大学院工学研究科 日比野忠史

1. はじめに

福山内港に流入する合流式下水道は近年の水需要の拡大や集中豪雨等により下水処理能力が充分ではなくなり、年間の未処理下水放流回数は 64 回を数えることもある。未処理下水の平均放流水 BOD は 40mg/L 以上であるため、内港一带には臭気の発生、スカム(臭気を発する浮遊固形物)の浮上、魚の斃死など水環境の悪化が懸念されている。このような水環境の悪化は福山内港だけでなく合流式下水道の放流水域での共通の問題になっており、下水処理施設の整備とともに放流水域での水環境の改善が必要とされている。本研究では福山内港において、水質・底質の性状と分布特性を調査するとともに、現地で採取した試料を用いて室内実験を行った。これらの実験からスカム発生機構の検討および、硫化水素抑制とへドロ浄化に実績のある石炭灰造粒物を用いて福山内港底泥に対する効果を確認した。さらに造粒物の撒布による底質浄化技術を超軟弱な海底泥に適用するために造粒物撒布に伴うめり込み量・圧密度を室内実験により明らかにし、現地に適した施工法を提案した。

2. 海田湾底泥との比較による福山内港底泥の性状把握

福山内港の底泥の分布特性や底泥から発生するスカムの性状を把握するため 2010/9/21, 10/7, 11/30 に福山内港最奥部に於て現地調査が実施された。柱状採泥された不攪乱試料の堆積泥を 2cm 毎にスライスした有機泥とスカムの含水比、強熱減量値、pH、ORP、CHNS 元素分析、粒度分布が測定され、分析結果を比較することで、スカムの特異性について検討した。図 1 に海田湾底泥と福山内港底泥およびスカムに含まれる強熱減量値に対する(a)炭素と(b)窒素含有量(CHNS 元素分析)の関係を示している。福山底泥は海田底泥と比較して強熱減量値や炭素含有量が高く、スカムは底泥よりもさらに有機物含有量が高いことがわかる。また IL-C の関係に現れる C/IL の勾配は福山底泥やスカムの方が海田底泥に比較して大きいことから、福山底泥やスカムは油分を多く含んでいることが予想される。N/IL の

勾配は、福山底泥とスカムで大きな差異は見られないが、福山底泥とスカムは海田底泥に比較して大きな値を示している。福山底泥には悪臭のもととなるアンモニアが含まれており、無機窒素が多く含まれていると考えられる。図 1(c)から福山底泥は海田底泥と比較して大径粒子の割合が大きく、大粒径の有機物が無機物を含んで存在することが予想される。有機物含有量が多いスカムにはさらに大径粒子の割合が多いことがわかる。福山底泥とスカムは季節的な変動はあるが海田底泥と比較して pH が低く酸性よりであり、一般的な下水の pH は約 6.2~7.0 程度であることから、その影響を受けていると考えられる(図

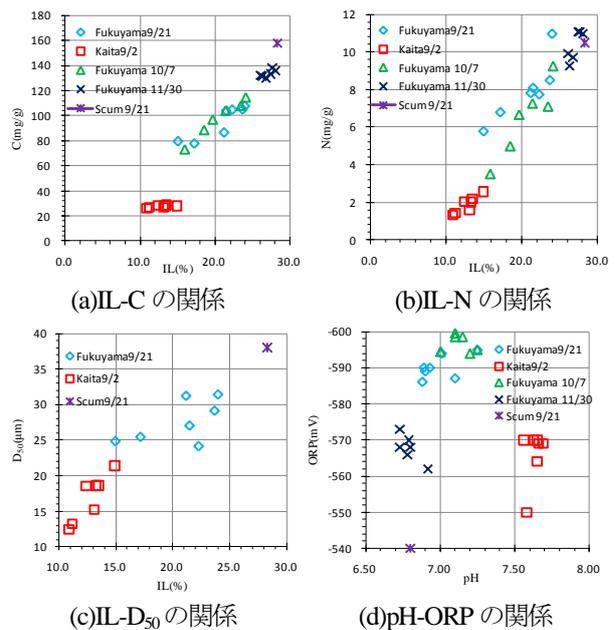


図 1 海田底泥および福山内港底泥、スカムの泥質特性

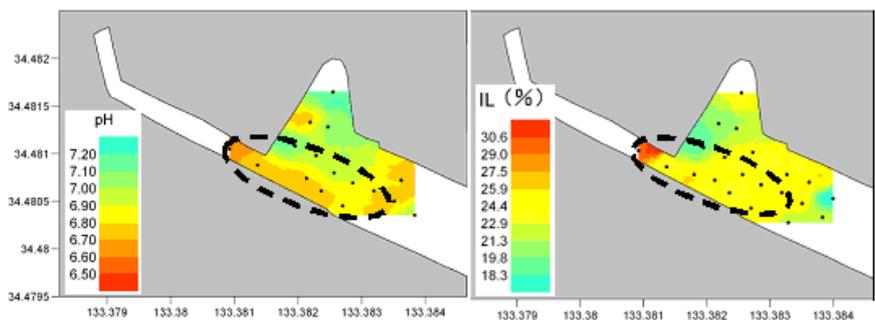


図 2 福山内港最奥部における表層泥の pH と IL の分布

1(d). ORP は海海底泥よりも低く、還元状態がさらに強いことがわかる(図 1(d)). 福山内港でのスカム発生源は表層堆積泥の浮上であることが確認されており、有機物含有量が多いスカムは海底に堆積している底泥と比較して密度が小さいため、底泥内で発生するメタンガス等が起因となって浮上し、水面を浮遊していると考えられる。

図 2 に 2010/11/30 の福山内港最奥部における表層堆積泥(0-2cm)の pH と IL の分布を示している。図 2 から放水路延長線上が、最も強熱減量値が大きく、pH が低い傾向を示している。さらに調査日に放水路延長線上で青潮の発生が確認されたことや同年 9/21 の調査日にはスカムが発見されたことを踏まえると、放水路上が最も未処理下水成分による有機汚濁が顕著であり、スカム発生箇所である可能性が高いと考えられる。

3. スカムの温度依存性に関する実験

調査地点周辺では春季から夏季にかけてスカムの大規模な発生が頻繁に確認されており、スカム発生の要因として水温と泥温の熱容量の違いやメタンガス等の発生が考えられる。スカム浮上に対する温度依存性を検討するため、以下の条件で室内実験を行った。現地で採取し冷蔵保存されたスカム(含水比:2000%, 強熱減量値:28.3%)をビーカーに湿潤状態で 100g 入れ、恒温機を用いて温度を一定に保った。水温とスカムの温度を経時的に測定し、浮上の有無を検討した。恒温機の設定温度は現地で測定された泥温である 15°C (5 月泥温), 20°C (7 月泥温), 27°C (9 月泥温)とした。ビーカー内のスカムの温度変化を図 5 に示す。本実験では水温とスカムの温度変化に大きな違いは確認されなかった。27°C と 20°C に設定したケースのみ泥の浮上が確認され、15°C に設定したケースにおいては実験開始約 32 時間後に 3mm 程度の膨脹変形が生じたが、浮上は起こらなかった。この結果から泥温度が泥の浮上に大きく関係していることが確認された。これはガスの発生量が泥温に依存しており、泥温が高くなるにつれてガス発生量が増加するためだと考えられる。

4. 石炭灰造粒物撒布による臭気成分の発生抑制効果

海田湾における石炭灰造粒物を用いた底質改善事業のモニタリング結果などから石炭灰造粒物による硫化水素抑制効果については確認済みである。海田底泥とは性状が異なる福山底泥に対する石炭灰造粒物による臭気ガスの発生抑制効果を確認するため、以下の室内実験を行った。現地で不攪乱採取された試料に約高さ 8cm 程度石炭灰造粒物を撒布し、約 3 週間後に上澄み液に含まれる臭気成分 (NH_3 , H_2S , $(\text{CH}_2)_3\text{S}$, CH_3SSCH_3 , CH_3SH) を分析した。その結果を図 6 に示す。検出されたどの項目も造粒物の撒布により臭気成分抑制効果が確認された。現地において硫化水素の発生を抑制することで青潮の抑制

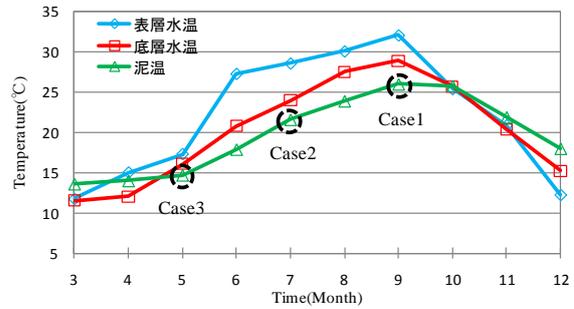


図 3 水温と泥温の季節変化



図 4 実験装置(a)浮上前,(b)膨脹後,(c)浮上後

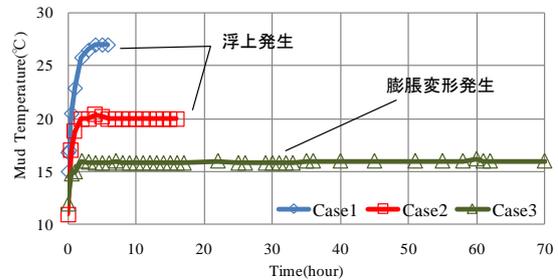


図 5 各ケースのスカムの温度の時間変化

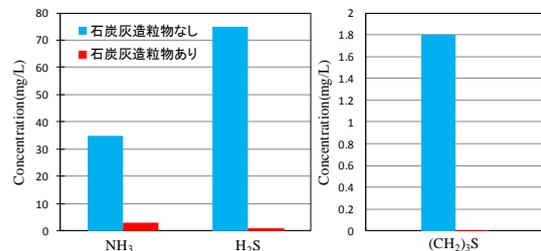


図 6 臭気成分の比較

を期待できるだけでなく、スカムの発生抑制も期待することができる。

5. 石炭灰造粒物撒布範囲の選定

前節で確認された石炭灰造粒物による底質改善技術を、限られた施工区域で最も効果的に現地に適用する撒布範囲を選定するにおいて、最も未処理下水による有機汚濁が顕著であり、スカム発生箇所である可能性が高いと考えられる放水路延長線上が最も底質を改善する必要があると考えられる。しかし放水路延長線上の水深は現在約 2.0m 程度であり、避難港に指定されている福山内港は最低でも 1.5m 以上の水深の確保(浅い場においては現状維持)が必要とされている。最適な撒布場所と考えられる放

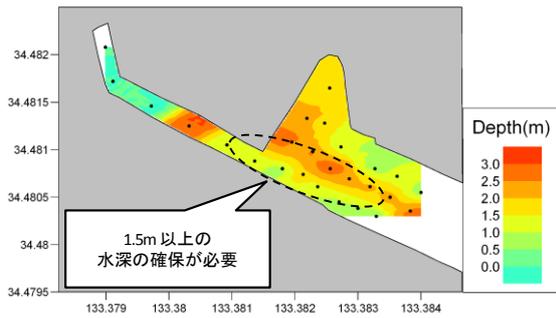


図7 福山内港最奥部における水深の分布

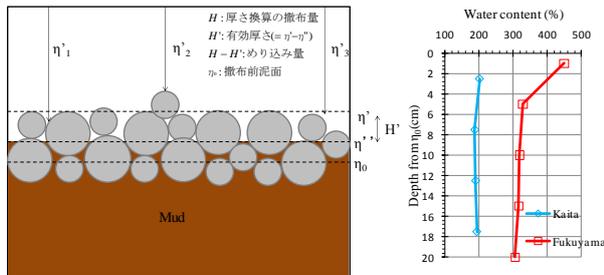


図8 めり込み量の定義

図9 撒布前の含水比鉛直分布

水路延長線上の水深が1.5m以下であり、石炭灰造粒物の撒布による水深の減少が問題となるため、石炭灰造粒物の撒布にともなうめり込み量と圧密量を含めた総沈下量を求め、現状の水深を維持することが可能となる撒布要領を決定する必要がある。

6. 造粒物撒布時の福山底泥のめり込み特性

福山内港の泥の堆積状態は非常に緩く、含水比は海田底泥に比較して数倍以上高い700%を超える非常に軟弱なことが現地調査結果から確認されており、石炭灰造粒物撒布時のめり込み量が大きくなることが予想された。そこで海田湾と福山内港の堆積泥を敷き詰めた水槽内で石炭灰造粒物を撒布する実験を行い、福山底泥のめり込み特性を検討した。

実験にはアクリル製水槽を用いた(横 350mm×奥行き 350mm×高さ 1300mm)。現地でエクマンバージ採取された泥を敷き詰めた後、30psuに調整された塩水で満たし、沈降圧密が落ち着いた約10日後に石炭灰造粒物を約21cm撒布した。水面から堆積泥表面まで1m以上あることから、石炭灰造粒物が泥面に衝突するまでに終端速度に達し、現地での撒布状況を十分に再現している(井上, 海洋開発 2010)。めり込み量は図8のように定義した。定期的に撒布後の表面高さをメジャーを用いて測定し、有効厚さは側面から直接測定した。図9は撒布直前の含水比の鉛直分布を示す。室内実験においても福山底泥の方が海田底泥よりも高い含水比を保持していることがわかる。図10(a)は有効厚さH'の時間変化を示す。海田泥では有効厚さは撒布後安定な高さを維持するのに対し、福山泥では10日間で約1.4cmの有効厚さの減少があった。これは含水比が高いため撒布後もめり込みが発生したこと

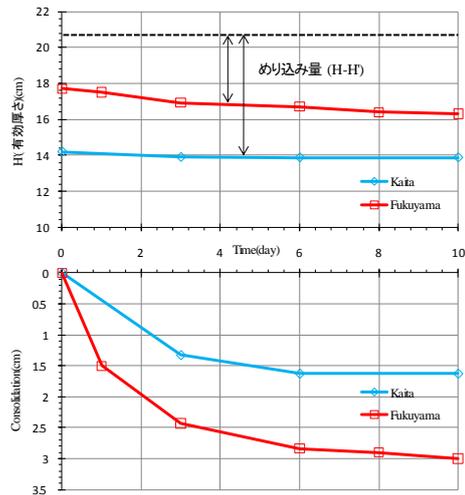


図10 (a)有効厚さ(b)圧密量の時間変化

表-1 各底泥の液性・塑性限界試験結果

	塑性限界 W_p	液性限界 W_L	塑性指数 $I_p(W_L-W_p)$
Fukuyama	65	148	83
Kaia	61	125	64

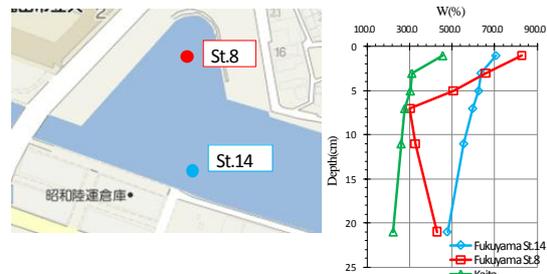


図11 施工予定区域の含水比の鉛直分布

によると考えられる。10日後のめり込み量は福山泥で4.4cm、海田泥で6.8cmであり、含水比の高い福山泥の方がめり込み量が小さくなる結果となった。また10日間の圧密量は海田で1.6cm、福山で3cm程度であり、福山泥の方が圧密量が大きくなった。以上の結果から、福山泥は海田泥に比較してめり込み量が小さくなる特性を持つ可能性が示唆された。

7. 液性指数を用いためり込み量推定手法の提案

6章の結果から造粒物撒布時の底泥内へのめり込み量は含水比だけでなく、泥のコンシステンシーにも依存すると考えられた。各泥の流動特性を検討するために液性塑性限界試験を行った。表-1に各底泥の液性塑性限界試験結果を示す。福山底泥は海田底泥に比較して塑性状態を保つ含水比の幅が広いこと、含水比が高くて破壊強度が低下しないことから、同程度の含水比では、福山底泥のめり込み量は海田に比較して小さくなることが予想された。そこで現地の含水比の鉛直分布を液性指数 I_L に換算後、現地調査結果において最も含水比が高い図12(a)のSt.8表層の液性指数と各層の液性指数の差をとったものを I'_L と定義して検討した。 I'_L は小さければ泥の流動性

が高く、高ければ流動性が低いことを示しており、造粒物撒布時の泥の抵抗力を表している。 I_L' の鉛直分布を近似式で表し、0.1cmごとの各層の I_L' の累積値が図12(c)に示してある。図中には点線で海田湾でのめり込み量の実測値を併せて示している。図12(c)の海田湾のめり込み量の実測値である7cmの深さでの $\Sigma I_L'$ は約300であり、これは造粒物が泥層を通過する時に受けてきた抵抗の総和が300になる深さまでめり込むことを表している。福山底泥の $\Sigma I_L'$ が300になる深さは約9cm~12cm程度であることから、有効厚さを確保するためには最低でも施工厚さ12cm以上の石炭灰造粒物を撒布する必要があることがわかった。

8. 石炭灰造粒物撒布にともなう圧密量の推定

石炭灰造粒物が海底に撒布されると石炭灰造粒物の自重によって底泥の圧密が促進される。撒布厚さの違いによる圧密沈下量を推定するために3種類の圧密試験を行った。エクマンバージ採取された福山堆積泥(W:270%, IL:15%)を圧密試験カラム(内径12cm,高さ21cm)に入れ、荷重をかけることで圧密させ、経時的に変位を測定した。実験は、造粒物の予定施工高さ30cm, 50cm, 70cmに相当する荷重をかけ、両面排水条件ひずみが安定する約9日間行った。図13(a)に9日後の各荷重とひずみの関係を示す。比較のため6章で行った石炭灰造粒物の撒布実験のひずみ量も図中に示した。圧密試験結果のひずみが撒布実験から求められたひずみよりも大きい値を示しているが、圧密試験では試料作成時の乱れがあることや、石炭灰造粒物と載荷板では泥面への力のかかり方が異なることによると考えられる。そこで図13(b)に示すように圧密試験から求めた勾配と6章の撒布実験結果を利用して、撒布実験における各撒布厚さに対する圧密量を推定した。

9. めり込み量と圧密量を含めた総沈下量の推定

めり込み量(図12(c))と圧密量(図13(b))をもとに各撒布厚さにおける総沈下量を図14に示す。めり込み量は撒布厚さに依存せず、また現地の堆積泥層厚は2mと仮定して圧密量を算出した。図14から30cm施工区域では造粒物の撒布によって10cm程度水深が増加するが50cm, 70cm施工区域ではそれぞれ7.2cm, 24cm程度水深が低下すると考えられ、石炭灰造粒物の撒布を行っても現状の水深を維持できると考えられる。

10. おわりに

現地調査および室内実験から得られた結果と今後の展望を以下に示す。

(1)福山底泥は海田底泥に比較して有機物含有量が高く、スカムは底泥よりもさらに高いことが確認された。また

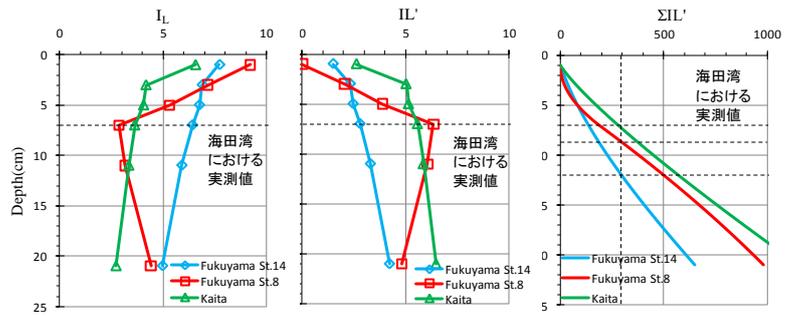
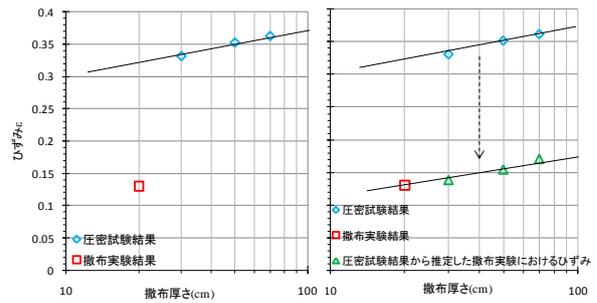


図12 (a) I_L , (b) I_L' , (c) $\Sigma I_L'$ の鉛直分布



(a) 荷重～ひずみ関係 (b) 撒布実験からの予測

図13 撒布厚さとひずみの関係

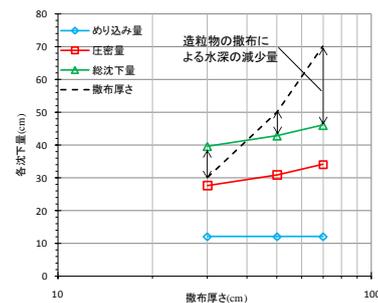


図14 造粒物の撒布時の総沈下量と水深減少量

福山底泥やスカムは構成する粒子の粒径が大きいことが確認された。スカムの浮上は泥温と密接に関係していることがわかった。

(2)含水比だけでなく泥の流動特性を用いてめり込み量を算出し、圧密試験から求めた圧密量も含めた総沈下量を推定した結果、予定最大施工高さである70cmを撒布しても水深の現状維持は可能であることがわかった。福山内港での施工において有効厚さを30cm以上確保するためには少なくとも厚さ50cmの施工が必要だと考えられる。

(3)施工後のモニタリングから、石炭灰造粒物によるスカムや青潮、臭気の発生抑制効果を確認し、さらに広範囲に施工区域を拡げていく予定である。

参考文献

1)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撒布時の沈降・めり込み特性, 海洋開発論文集, 第26巻, 2010.