

広島湾における効率的な底質改善技術の効果の検証

—海田湾をパイロット海域とした現地調査および室内実験からの検討—

A STUDY OF AN EFFICIENT TECHNIQUE FOR IMPROVEMENT OF MUDDY SEDIMENT IN HIROSHIMA BAY

西田芳浩¹・川内清光¹・山本裕規²・首藤啓³・日比野忠史⁴
 Yoshihiro NISHIDA, Kiyomitsu KAWAUCHI, Hironori YAMAMOTO,
 Akira SUDO and Tadashi HIBINO

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 工修 復建調査設計株式会社 (〒732-0052 広島市東区光町2-10-11)

³正会員 (財) 港湾空間高度化環境研究センター (〒108-0022 東京都港区海岸三丁目26-1)

⁴正会員 博(工) 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)

To develop an efficient technique for improvement of muddy sediment in head of Hiroshima Bay, we conducted field observation in Kaita Bay and some experiments. The field observation data showed that Dissolved Oxygen (DO) concentration in Kaita bay were less than 3 mg/L at the middle and bottom layer. Additionally, the variation of DO concentration corresponded to ignition loss and turbidity at the bottom layer. It means that accumulation of organic matters and production of high turbidity layer are significant factors of DO decrease in Kaita bay. Taking these result into account, we performed some experiments using industrial arising as covering material. As a result of the experiments, we found that around 5cm thickness of the covering layer would be effective to restrict resuspension rate and to reduce high turbidity layer.

Key Words : dissolved oxygen, turbidity, sediment, resuspension, arising, 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⁾。

底質改善対策として, これまでは有機汚濁の進んだ海底泥の浚渫や覆砂などが実施されてきたが, 新たに発生する汚泥の処理の問題や, 瀬戸内海における海砂採取の全面禁止に伴い覆砂材料の確保が困難になっている。そのため, 最近では石炭灰, 鉄鋼スラグといった産業副産物を利用した底質改善技術の開発も行われるようになってきている^{2)~4)}。一方, 貧

酸素水塊の発生などを抑制するためには広範囲での底質改善が有効な対策と考えられるが, 経済産業省中国経済産業局が試算した結果⁵⁾によると, 広島湾において覆砂厚 0.5m で覆砂を行う場合の対策費用は約 30 億円/km² と高額であり, 従来よりも低コストの底質改善技術が求められている。

このような背景の中, 平成 19 年 3 月に策定された「広島湾再生行動計画」では, 赤潮や貧酸素水塊の発生抑制を広島湾における水環境の課題として挙げており, 水環境を改善するための取り組みとして, 広島湾奥部(海田湾)において, 効率的・効果的な底質改善技術開発のためのパイロット事業の検討を進めることとしている⁶⁾。

一般に, 閉鎖性海域における貧酸素水塊の発生には, 海底付近での有機物の分解や栄養塩の溶出といった過程と密接な関係があるとされており, 広島湾においても有機物を多く含んだ泥の堆積と, 堆積した泥の巻き上げに起因する海底付近の高濁度層の存在が貧酸素水塊の発生などに影響を与えていると考えられている^{7~9)}。

以上より, 本研究では広島湾奥部に位置する海田

湾を対象に、低コストかつ効果的に底質改善を実施できる技術の開発を目的として、現地調査により海田湾の水質・底質等の現状を把握するとともに、その結果を踏まえ、底質の巻き上げを抑制することが可能な底質改善技術を考案し、その手法の有効性について室内実験による検証を行った。

2. 現地調査結果

(1) 調査の目的

パイロット事業の候補地である海田湾における貧酸素の研究事例としては、横田ら（2006）⁹⁾ などがあるものの、発生の現状と要因については不明確な部分も多い。また、水質・底質に関する研究事例も少なく、現状を把握するための調査が必要と考えられた。そこで、海田湾における貧酸素の発生状況やその発生要因、水質・底質の現状把握を目的に海田湾において現地調査を実施した。

(2) 調査方法

海田湾全域における水質・底質の現状を把握するために「水質・底質調査」、DO や水質の変動を詳細に把握するために「連続観測」を行なった。各調査の調査方法は以下のとおりである。

a) 水質・底質調査 調査方法

水質調査は、2008年9月29日、10月14日、12月3日に図-1に示す ST.1~6 で行なった。多項目水質計（YSI-model6600）を用いて、水温・塩分・溶存酸素（DO）・濁度・pH を鉛直的に 1m ピッチで測定した。また、バンドーン型採水器を用いて、表層（海面下 2m）、下層（海底上 1m）の採水を行い、実験室に持ち帰り、分析に供した。

底質調査は、2008年9月27日、10月14日、12月4日に行なった。水質調査と同様の地点（ST.1~6）においてダイバーによりアクリルコアを用いて柱状採泥試料を採取した。採取した底質試料は表層（0~2cm）、下層（2~4cm）を分取し、分析に供した。

b) 連続観測 調査方法

連続観測は、図-1 の ST.1 において、2008年9月29日から10月14日および2008年12月3日から12月19日のそれぞれ15昼夜間実施した。2008年9月29日から10月14日の観測では、ST.1に加え、湾口側からの水塊の流入の有無を評価するために ST.1' を ST.1 から 15m 流軸方向沖側に設けた。

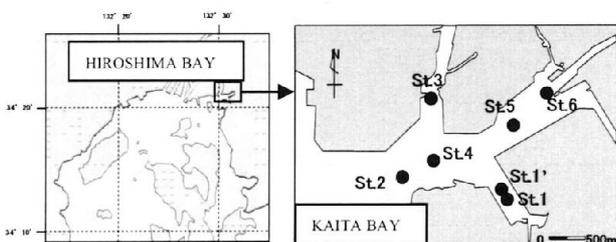


図-1 現地調査地点図

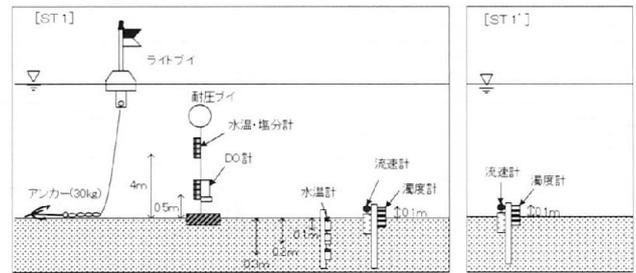


図-2 連続観測実施要領

ST.1 では、海底直上 0.5m に DO 計、水温・塩分計、海底直上 0.1m に濁度計、流速計、海底直上 4m に水温・塩分計、海底下 0.1m、0.2m、0.3m の箇所には水温計をそれぞれ設置した（図-2）。ST.1' では、海底上 0.1m の箇所に流速計・濁度計を設置した（図-2）。

(3) 調査結果および考察

a) 海田湾における貧酸素の発生状況

図-3 に各観測日における DO の鉛直分布を示した。DO は 2008年9月29日の調査時に最も低く、ST.1~6 の全ての地点において水深 4m 以深で 3mg/L 以下と、海田湾全域に渡って貧酸素状態となっていた。特に、海田湾奥部に位置する ST.5、ST.6 および海田湾への流入河川である猿候川の河口に位置する ST.3 では、表層 0m でも DO は 3mg/L 以下と全層にわたり貧酸素化していた。

第六管区海上保安本部によって ST.4 付近で実施されている月 1 回のモニタリング結果によっても、今回得られた観測結果と同様に、2008年の8月および9月では表層でも DO が低下していたことが確認されている¹⁰⁾。

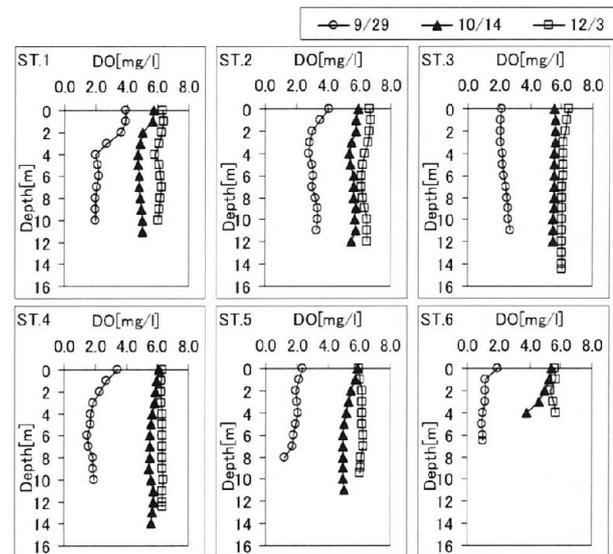


図-3 DO の鉛直分布

海田湾奥部で表層まで貧酸素化する原因については、現時点では定かではない。しかしながら、海田湾と同様に流入河川があり富栄養化の著しい海域である洞海湾でも、湾奥部の表層で貧酸素となる現象

が報告されている¹¹⁾。この原因として、河川水の供給によって水深1m程度の浅い場所に密度躍層が形成され、且つ、植物プランクトンの増殖が活発なため、中・底層に光が届きにくい環境にあり、ほぼ全水深で有機物の分解が卓越することが挙げられている。また、エスチュアリー循環によって底層の貧酸素水塊が表層まで湧昇することなども原因として考察されている。

今回の観測で見られた海田湾奥部の表層の貧酸素化は、水深が比較的浅く、富栄養化の進んだ淡水供給のある海域における現象であると考えられる。

b) 海田湾における DO と水質・底質との関連性

海田湾における DO は湾奥部ほど低い傾向が見られた。このような DO の空間的な分布と水質・底質の分布の関連性について解析を行なった。

図-4a は貧酸素の発生が著しかった 9 月 27-29 日の底質中の強熱減量と底層 DO の関係を示したものである。DO の低下が著しい海田湾奥部では強熱減量も高く、DO の低下に底質への有機物の蓄積の影響が強いことが示唆される。

また、水柱内の平均濁度についても、猿候川河口の ST.3 を除き、湾奥部で高くなる傾向が見られた。このことから、水柱内の濁質の量も DO を低下させる要因であると考えられる(図-4b)。一方、ST.3 で他の地点と比較して濁度が高いにも関わらず DO が相対的に高くなっているのは、ST.3 が河口に位置しており、河川水の影響が大きく、平均値の評価では整理が難しいと考えられる。実際に、三島ら(2001)¹²⁾によれば、ST.3 付近の底質中の有機物は炭素安定同位体比が低く、陸域からの流入負荷の影響を強く受けていることが示されている。

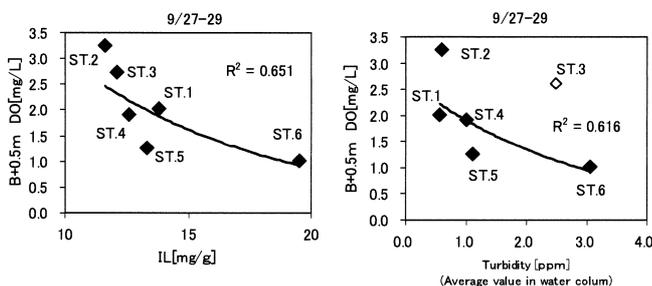


図-4 海田湾における底層 DO と強熱減量 (a) および水柱内の平均濁度 (b) の関係

c) 海田湾における DO の時間変動とその要因

図-5 に 2008 年 9 月 29 日から 10 月 14 日の間の ST.1 および ST.1' における濁度および DO の変動を示した。ST.1 における DO は数日単位での濁度の急激な上昇に伴い、大きく低下する傾向が見られた(図-5 中 実線の囲い)。広島湾では、気象擾乱時の底泥の巻上げに伴い、海底付近での酸素消費が増大する現象が報告されている^{8,9)}。このことから、底泥の巻上げに伴い、底層の濁度が上昇し、DO が低下した可能性が考えられた。

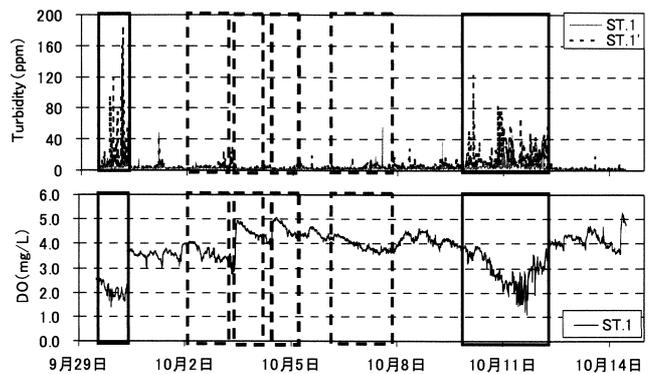


図-5 ST.1, ST.1'における底層 DO と濁度の変動

しかし、底層の流速と濁度の関係を見てみると、底層の濁度の上昇時の底層の流速は 1~2cm/sec と低かった(図-6)。このことから、今回の観測で見られた底層濁度の数日単位での急激な上昇は、流速の上昇に伴う海底面の破壊による底泥の巻上げ以外の要因によって生じていたと考えられる。

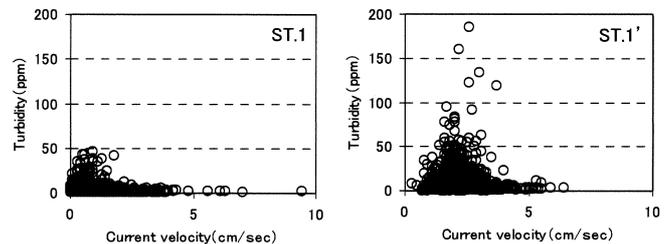


図-6 ST.1, ST.1'における底層濁度と流速の関係

図-7 は、濁度の数日単位での上昇が見られた期間中の ST.1 および ST.1' の水温、濁度の変動について示したものである。ST.1, ST.1' とともに濁度の上昇とほぼ同調して、底層水温が低下する傾向が見られた。また、底層水温は、湾口側に設置していた ST.1' で相対的に大きく低下しており、その期間も長かった。濁度についても、ST.1 と比較し、ST.1' で大きく上昇しており、また、その期間が長かった。このような点から、ST.1 の湾口側から低

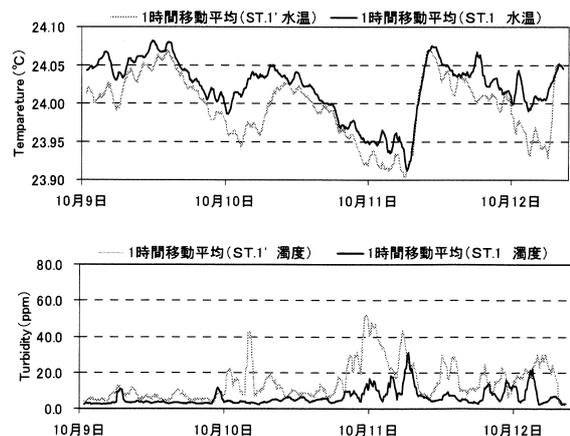


図-7 ST.1, ST.1'における底層水温と濁度の変動

水温・高濁度の水塊が移流してきており、これが底層濁度上昇の要因であった可能性が考えられる。

また、移流してきた高濁度水塊の発生過程として、濁度の上昇が見られた3~5日ほど前には日降水量10mm以上の比較的まとまった降水があったことから、河川からの濁水の流入や植物プランクトンの増殖・沈降、観測地点とは別の場所での底泥の巻き上げなどが推論される。

高濁度水塊の移流以外に考えられる ST. 1, ST. 1' おける高濁度の発生過程として、底層付近へ低水温水塊が流入することで、底泥表面の微少な領域で、海水の鉛直的な密度勾配が逆転し、流動場の鉛直的な乱れが生じていた可能性が挙げられる。

一方で、DOの低下は、濁度の上昇が生じていない時にも見られる(図-5中破線の囲い)。このことは、水中での有機物の分解や底泥表面での酸素の消費などの他の要因もDOの低下に大きな寄与を持つことを示している。

d) 海田湾における底泥中の有機物の分布特性

海田湾における貧酸素の発生には、底泥への有機物の蓄積や高濁度の発生が重要な要因であると考えられ、底泥の有機物がどのような特質を持っているかを明らかにすることは、貧酸素の発生過程を考える上で重要と思われる。

図-8は、今回の観測で得られた海田湾における底泥中の強熱減量とPOC、PON含有量の関係を示したものである。比較対照として、別途、採取・測定した呉湾の底泥中の値についても示してある。海田湾の底泥中の強熱減量とPONの含有量は、呉湾とほぼ同程度であるのに対して、POC含有量については、呉湾よりも高いことが分かる。また、C/N比について計算してみると、海田湾では12~16程度と植物プランクトンの生細胞のC/N比(6~7程度)¹³⁾より高かった。このことは、海田湾における有機物が植物プランクトン以外の有機物を多く起源を持つことを示唆している。

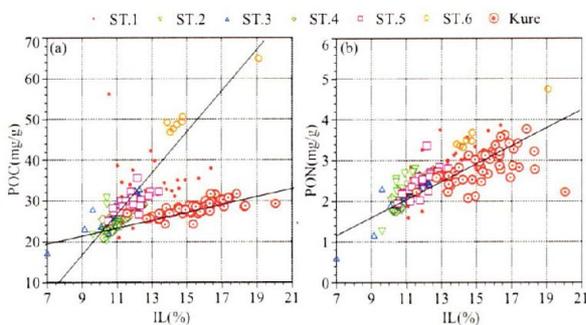


図-8 海田湾・呉湾底質中の強熱減量とPOC・PONの関係

三島ら(2001)¹²⁾によれば、海田湾奥部の炭素安定同位体比は低く、陸起源有機物の影響を強く受けていることを示していることから、海田湾の底泥中のC/N比が高い原因についても陸起源有機物の影響が考えられる。

3. 室内実験による底質改善効果の検証

(1) 海田湾における底質改善技術(案)

現地調査の結果より、海田湾では、底層の高濁度の発生によってDOが大きく低下することが示された。海田湾奥部の高濁度の発生要因は複数考えられるものの、広島湾奥部では、底層流速の上昇に伴い、高濁度が発生することが報告されている¹⁴⁾。このような点から、底泥の巻き上げを抑制することが一つの有効な貧酸素の改善対策と考えられた。そこで、従来の覆砂のように数十cmの覆土を行なうのではなく、底泥表面の数cm程度を覆土材料で覆い、底泥を圧密することで巻き上げを抑制し、酸素の消費を減少させる手法の適用について検討した。このような手法を用いることで、従来の覆砂よりもコストパフォーマンスに優れた底質改善が可能になると考えられる。以下では、底泥の巻き上げを抑制するのに適した覆土材料や層厚などを検討し、その効果を検証するための、室内実験を行った。

(2) 種々の材料による底泥の圧密実験

a) 目的

一般的に巻き上がりは底泥の表層で行われており、泥表層の状態が重要である。特に表層の含水比が高い場合には、底泥は緩い状態にあるため外力に対する抵抗力が小さく、巻き上がり易くなっている¹⁴⁾。本節では異なる材料を用いて底泥を覆土する室内実験を行い、覆土材料別の底泥の圧密効果を評価した。

b) 実験方法

覆土材料による底泥の圧密効果を評価するため、図-9のように不攪乱採取した柱状の底泥の上に覆土材料を静置することで材料の自重による圧密を測定した。実験に用いた底泥試料は海田湾海底(ST.1)で2008年12月4日と12月19日に採取されたものであり、直径40cm、高さ50cmのアクリルパイプに入った試料がそれぞれ3本、直径20cm、高さ50cmのアクリルパイプに入った試料が各5本の合計16本である。



図-9 圧密実験の実施要領

表-1に実験ケースを示す。実験では覆土材料を底泥表面に散布した状態で2008年12月4日の試料は一週間、2008年12月19日の試料は三週間、それぞれ静置した後、含水比の鉛直分布を測定した。覆土材料としては石炭灰造粒物、砂、かき殻、スラグを用い、比較のために、覆土なしの場合についても実験を行った。石炭灰造粒物については大きさがΦ40mmとΦ2mmの2つについて検討した。また、散

布厚さについても1層から3層までの場合について比較を行った。

覆土材料別の底泥の圧密過程を観察するため、アクリルパイプの側面から写真撮影することで底泥の圧密度の経時変化を評価した。なお、ここでは圧密度を柱状の底泥試料のひずみ ϵ （底泥試料の体積変化量 ΔV /単位面積当たりの底泥試料の全体積 V ）としている。なお、本稿では圧密度の解析結果を述べる。

表-1 圧密実験の実施ケース

No	覆土材材料	厚さ	備考
1	石炭灰造粒物 (Φ40mm)	1層	湿潤状態
2		2層	湿潤状態
3		3層	湿潤状態
4		1層	湿潤状態
5		2層	湿潤状態
6		2層	乾燥状態
7	覆土なし	-	-
8	砂	5mm	-
9		10mm	-
10		20mm	-
11	かき殻+石炭灰造粒物	1枚+1層	-
12	覆土なし	-	-
13	石炭灰造粒物 (Φ2mm)	5mm	-
14	砂	5mm	-
15	スラグ	5mm	-
16	石炭灰造粒物 (Φ40mm)	2層	乾燥状態

c) 実験結果

図-10は圧密度の時間変化を示している。全てのケースにおいて実験開始後5時間以内で極端に圧密が進み、100時間ではほぼ終わる。砂もしくは石炭灰造粒物を用いた実験ケースNO.2, 3, 5, 8, 14では圧密度が0.015以上で大きく、覆土材無しの場合のNO.12とスラグを用いたNO.15は0.005付近で極端に小さくなっている。なお、NO.15については、実験の開始が他の実験より数日遅れており、自重圧密が進行していたため、圧密度が低かった可能性がある。

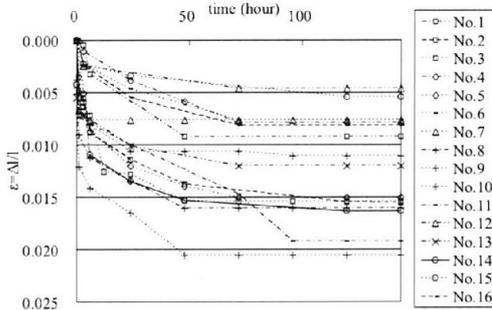


図-10 圧密度の時間変動

図-11は、最終鉛直ひずみと覆土材料の単位面積当たりの水中重量との関係を示している（自重圧密が進行した後に実施したケースNO.15については除外してある）。一般的に間隙水の排水は覆土材料の荷重が大きいほど促進されると考えられる。覆土材料ごとに見ると概ねその傾向を示しており、砂に替わる代替材として期待される石炭灰造粒物についても、一定の圧密促進効果が得られるものと期待される。

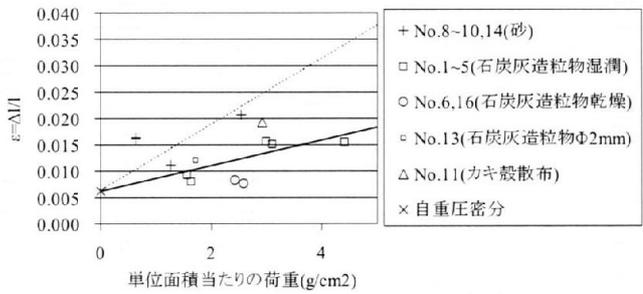


図-11 単位面積あたりの加重と圧密度の関係

(3) 被覆による底泥の巻き上げ抑制効果の検証実験

a) 目的

実際に覆土材を用いて被覆を行なった場合の底泥の巻き上げ抑制効果について、層厚などを変化させ検証を行なった。

b) 実験方法

図-12のように回流水槽内に静置した泥（ST.1で採取）の上に覆土して一方向の流れを起こし、巻き上がり量の差から覆土材料別の巻き上がり抑制効果を評価した。流速は5分間隔で増加させ、巻き上がり量は5分間の濁度の測定値から濁度増加量を巻き上がり量に換算した。濁度は透過型レーザーセンサー（キーエンス社製）の透過光率を図-13に示す濁度とレーザー透過光率の関係を用いて換算することで求めた。泥や覆土材料の実験条件は表-2に示した。なお、被覆材料には石炭灰造粒物を用いた。

c) 実験結果

図-14に底面流速と巻き上がりフラックスの関係を示す。まず、覆土材料を散布していない状態で底泥の含水比の違いによる巻き上がり量の違いを確認した（図-14a）。現地で観測された流速の範囲は最大6cm/secであり、本実験の含水比の範囲内では、一方向流での底泥の巻き上がりは起こらないことが予想される。巻き上がりフラックスは底泥含水比と

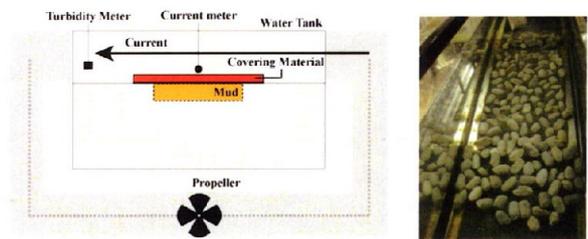


図-12 巻き上げ抑制実験の実験要領

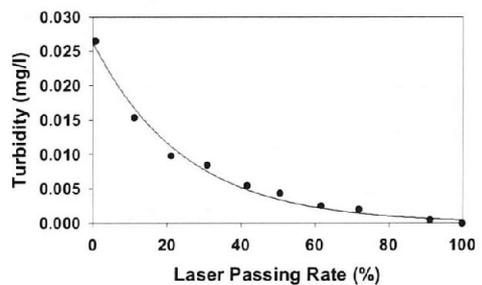


図-13 濁度とレーザー透過率の関係

表-2 巻き上げ抑制実験の実験ケース

CASE	salinity	泥の設置方法	石炭灰造粒物の設置状況		water content (%)
	psu		施工高さ(cm)	密度(g/cm ²)	
1-a	32.00	沈降	0	0	464.39
2-a	30.05	沈降なし	0	0	330.08
2-b	29.91	沈降なし	1	1.60	347.02
2-c	29.70	沈降なし	5	4.42	313.90
3-a	33.00	沈降なし	0	0	284.70
4-a	30.25	沈降なし	0	0	248.06
4-b	29.91	沈降なし	1	1.60	239.69

の関係が高く、含水比が高いほど巻き上がり量が増加する。特に含水比が450%以上になるケース1-aではその量が極端に増える。

図-14bと図-14cは含水比300~350%までの底泥と含水比240%程度の底泥に石炭灰造粒物を散布した場合の実験結果を示している。石炭灰造粒物を一層散布した場合、散布しない場合より巻き上がり量が数倍多い。これは底泥表面に石炭灰造粒物による凸凹面が形成され表層の直上で乱流が発生することにより巻き上がりが助長されるためと考えられる。5cm以上石炭灰造粒物を散布することで十分な巻き上がり抑制効果が得られており、含水比約240%の泥についても効果が確認された。

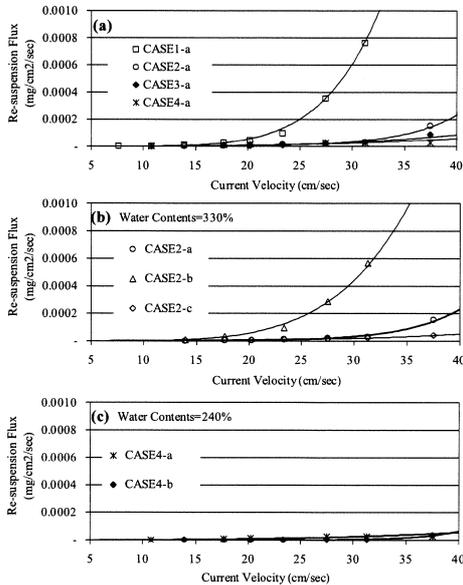


図-14 流速と巻き上がり量の関係

4. まとめ

1) 海田湾は夏季には全域に亘って貧酸素水塊が形成され、湾奥部では表層でも貧酸素化することが明らかとなった。また、DOの分布は底質の有機物含有量の分布や濁度の変動とよく一致しており、底質への有機物の蓄積や海底付近の高濁度層の形成がDOを低下させる要因であると考えられた。また、底質への有機物負荷源として、陸域からの有機物の負荷の影響があると考えられた。

2) 広島湾奥部における底質改善技術として、被覆

材(産業副産物など)を海底表面に敷設し、底泥の巻き上げを抑える手法を室内実験より検証した。その結果、石炭灰造粒物を使用する場合はある程度の圧密促進効果が期待され、且つ5cm程度の被覆を行うことで底泥からの巻き上げを抑制することが確認された。

本稿で提案する底質改善技術では、対策費用は層厚0.5mの覆砂の3分の1程度になると試算され、従来よりも効率的な底質改善が可能になると考えられる。

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) 浅岡聡,山本民次:石炭灰造粒物による有機底泥の改善,用水と排水,Vol.51, No.2, pp.63-69, 2009。
- 3) 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.31, No.8, pp455-462, 2008。
- 4) 宮田康人,佐藤義夫,清水悟,小山田久美:製綱スラグによる海域の底質改善, JFE 技研, No.19, pp.1-5, 2008。
- 5) 平成19年度産業公害防止対策調査 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:平成20年3月,経済産業省中国経済産業局。
- 6) 広島湾再生行動計画:平成19年3月,広島湾再生推進会議。
- 7) 日比野忠史,松本英雄:広島湾に分布する浮泥の特性と季節的な性状変化,土木学会論文集B, Vol.62, No.4, pp.348-359。
- 8) 長尾正之,橋本英資,朱小華,吉田みゆき,高杉由夫:広島湾における海底酸素消費量の連続測定,土木学会, 663, 11-53, 2000。
- 9) 横田佳祐,橋本英資,長尾正之,高杉由夫:海田湾における貧酸素水塊の変動要因,海と空, 82, 13-21, 2006。
- 10) 環境保全調査, [オンライン] <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN6/suishitu/suishitumenu.htm>, 平成21年2月,第六管区海上保安本部。
- 11) 東輝明,山田真知子,門谷茂,広谷純,柳哲雄:過栄養な内湾 洞海湾における貧酸素水塊の形成過程とその特性について,日水誌, 64, 204+219, 1998。
- 12) 三島康史,星加章,谷本照己,上島英機:海田湾の水・底質環境-海田湾における底質環境修復技術の研究(I)-,中国工業技術研究所報告, 56, 1-38, 2001。
- 13) Redfield, A. C., B. H. Ketuchum and F. A. Richard: The influence of organisms on the composition of sea water, In the sea, Vol.2, pp.26-77, 1963。
- 14) 朱小華,高杉由夫,橋本英資,安田秀一:広島湾における底層懸濁物質の濃度変動,沿岸海洋研究, 37, 59-67。
- 15) 田多一史,日比野忠史,松本英雄,村上和男:間隙水の流動に伴う底質の性状変化,海岸工学論文集, 第51巻(2), pp.991-995, 2004。