

ヘドロ被覆設計のための海底有機泥挙動の把握

A STUDY OF FLUID MUD BEHAVIOR FOR DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT COVERING TECHNIQUE AT KAITA BAY

日比野忠史¹・三戸勇吾²・今川昌孝³・駒井克昭⁴・木村道夫⁵

Tadashi HIBINO, Yugo MITO, Masataka IMAGAWA, Katsuaki KOMAI and Michio KIMURA

¹正会員 博(工) 広島大学准教授 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 博(農) 復建調査設計株式会社環境技術部水圏環境課 (〒732-0052 広島市東区光町2-10-11)

³学生会員 修(工) 広島大学大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

⁴正会員 博(工) 広島大学助教 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

⁵正会員 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)

In order to develop an efficient covering technique using fly ash, we investigated fluid mud behavior and hypoxic water mass at Kaita Bay. We also designed verification test from the result of investigation. According to the results of investigation, we thought that the density difference between water and suspended matter changed by water temperature, which became a triggers suspension of suspended matter near sea bottom, and also a promotion factor of hypoxic water mass. Meanwhile, it was found that suspended matter penetrated from sea bottom around the bay entrance of the verification test area. From these result, we designed a covering method that 20cm thickness layer of fly ash is set at the bay entrance in order to block the penetrated suspended matter. In addition, we designed 10cm and 5cm thickness layer of fly ash, in order to evaluate the function of trapping the suspended matter inside the fly ash layer by void structure, and inhibiting the resuspension of suspended matter near sea bottom.

Key Words : hypoxic water mass, turbidity, resuspension, penetration, improvement technique, verification test

1. はじめに

海田湾は広島湾奥部に位置する平均水深約 10m の小湾であり、湾内には猿候川、瀬野川が流入している。海田湾には有機泥が集積されるために、現在もヘドロ化が進行している海域である。このため、広島湾で秋期に貧酸素状態が解消された後も海田湾では貧酸素状態が継続している等、海田湾は広島湾において水質悪化が最も進んだ海域である。海田湾底泥には C/N 比が 30 を越える有機泥があり、同じ広島湾奥に位置する呉湾海底の C/N 比が 12 程度の有機泥の輸送堆積形態とは異なった機構があることがわかっている¹⁾。

本研究は、ヘドロ化した閉鎖性海岸域において貧酸素化を抑制する技術として提案された石炭灰造粒物をヘドロ上に巻き出す工法²⁾の実証実験を効率的に行うために被覆材の必要断面を明らかにするものである。被覆材の必要断面を決定するため、海田湾実験区に輸送され堆積する有機泥の物理的挙動や湾外水の流入出と海底濁度の上昇との関係を現地調査より把握した。実証実験の必要断面は実験区で起こる物理的な根拠に基づき決定しており、施工後に行われるモニタリング結果を物理的、化学的に解析した後に実用化にあたっての最適な断面が決定される。

2. 実証試験の概要とヘドロ被覆設計の論点

実証試験はヘドロの堆積する閉鎖性海域(図-1に□で示す範囲, 300m×200m)において行う。実証実験の重要課題は底層高濁度層を減少させ貧酸素化を抑制するために必要な石炭灰造粒物被覆層の厚さとその効果の持続期間を推定することにある。本研究では、石炭灰造粒物層によるヘドロの巻き上げの抑制効果および石炭灰造粒物層に形成される間隙による新生堆積物のヘドロ化防止能力を発揮できる被覆断面を検討することを目的とする。具体的には、現地調査の解析結果を基に、海底直上を移流する浮遊有機泥を捕捉できる被覆材の施工高さ(厚さ)、および海面から沈降する有機泥(新生堆積物)を捕捉するために必要な石炭灰造粒物層の間隙量を明らかにする。

3. 流況・水質調査と沈降物捕集調査の概要

(1) 海底層における水質、流速の調査

海田湾での濁質の輸送過程を把握するため海底層における水質と流向流速の連続観測を図-1の調査地

点で行った。実験区内のST. 1において、2008年9月29日～10月14日（10月期）、12月3日～12月19日（12月期）および2009年8月11日～28日（8月期）のそれぞれ15昼夜間超の流速、水質の連続測定が行われた。中層に多項目水質計、海底直上にD0計、水温・塩分計、濁度計、流速計を設置、海底下には水温計を埋設した。測定に用いたセンサーはアレック電子社製のCompactシリーズである。なお、センサーの設置高さは本文中に示している。

(2) 底泥採取調査

図-1に示す調査点（●）で2008～2009年に海底堆積泥が柱状採泥器で不攪乱採取された。採取した海底堆積泥は表層から約2cm毎に分割した後、含水比、粒度分布、ORP（酸化還元電位）、IL（強熱減量値）およびPOC（懸濁態有機炭素）、PON（懸濁態有機窒素）の含有量が分析された。

(3) 沈降物の捕集調査

ST. 1において連続観測と同時に沈降泥の捕集調査を行った。10月期には海底面、12月期と8月期には海底面と海底面上より3mの地点にセジメントトラップを設置した。海底面では9個のトラップを1m間隔で格子状に設置して海底層での有機泥の動きを捉えることを試みた。10月期と12月期は図-1に示すS2に1セット、8月期にはS1～S6の6地点に各1セットを配置した。海底面での沈降物採取はトラップの開口部が海底面上5cmになるように埋設した。捕集された沈降泥のSS flux、粒度分布、沈降速度、IL、POC、PONが分析された。

4. 実証実験区での貧酸素化の機構と海底泥の挙動



図-1 海田湾（実験区）地形図と底泥採取地点

(1) 海底堆積泥に含まれる有機物の性状

広島湾での有機泥の採取調査から海底堆積泥の有機物含有量が多く、有機物の分解度が低い（一次生産起源の有機物ではC/N比が小さい）場合に高含水状態が維持され易いこと、呉湾底泥に比べて海田湾底泥には有機物含有量が2～4%程度小さく、分解の進んだ有機物が多く含まれていること、海田湾での堆積泥を構成する有機泥の由来が一次生産起源ではないPOC含有量の高い有機物（植物由来でない油脂分）が多く存在していることがわかっている³⁾。

図-2に2008年9月～2009年8月に海田湾海底で不攪乱採取された堆積泥の(a)含水比、(b)ORP、(c)IL、(d)C/N比のLine1（湾口（ST. 2）～奥部（ST. 6））とLine2（湾奥～ST. 1）に沿う分布が示されている。ただし2009年はST. 2とST. 5での採泥結果はない。また、2009年8月には実験区奥（ST. 1-2, ST. 1-3）での採泥結果が示されている。湾全域の海底表層には250～500%程度の含水比状態で有機泥が堆積していた。Line1ではST. 4にC/N比の小さい比較的新鮮な有機泥が堆積しているため、2008年9月を除き表層の含水比は湾口部で高くなる傾向にあった。また、分解が進み保水性の低くなった有機物が堆積する冬期に低くなった。Line2では湾奥に向かうにつれてILとC/N比は増加する傾向を有しており、ST. 1（実験

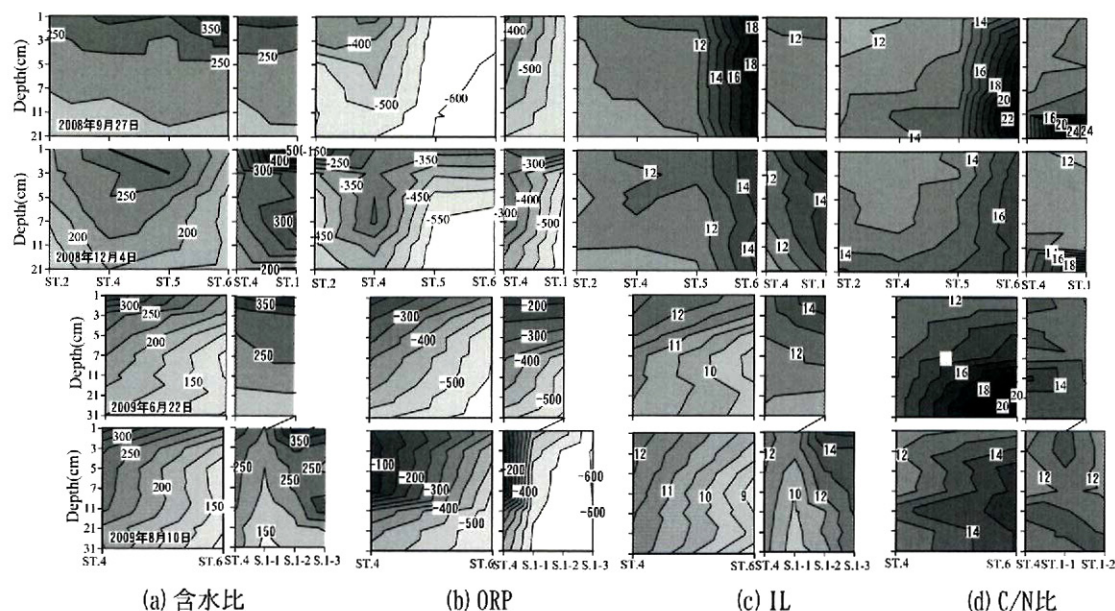


図-2 海田湾底泥の含水比および有機性状の分布

区)では年を通して含水比が高い傾向にある。ST. 1では、C/N比は1季節の変化は12~13と小さく高い含水比とILが維持されていることから、有機物の流入が年間を通じて起こっていることが予想される。

(2) 海底層での密度(塩分・水温)状態と濁度、D0の変動

第六管区海上保安部による2008年7月~10月の観測結果(<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN6/>)によれば、広島湾では、10月には躍層が消滅し貧酸素状態が解消されているが、海田湾に向かって貧酸素状態が強くなっており、本研究で10月14日に行ったD0調査においても海田湾全域で6mg/l以下の貧酸素状態にあることが観測されている。特に湾奥部(瀬野川河口)においては水深4mの底層でのD0は4mg/l以下であった⁴⁾。

図-3には2008年の(a)10月期、(b)12月期と2009年の(c)8月期に測定された海底層(B+0.5mまで)における(1)潮位変動、塩分、(2)濁度、D0の経時変化および(3)海底上0.1mの水温変化、B+0.5mとB+0.1mでの水温差(正值はB+0.5mで水温差が高い)、(4)B+0.1mと泥内(10月期、12月期はB-10cm、8月期はB-5cm)での水温差が示されている。

海田湾での貧酸素状態が解消されているのは12月期のみであり、この時期には、B+0.1m層での濁度は数ppm程度である。一方で、貧酸素化が最も進行しているのは8月期であり、底層濁度が最も大きい(B+0.05mで平均5ppm)季節でもある。また、2008年10月10~11日付近のD0の極端な低下は濁度の上昇と同調しており、海底での高濁度の発生がD0の低下に大きく影響していると考えられる。

海底直上での流速は全観測期を通じて数cm/sでしかなく、濁度やD0の低下と明確な関係性は見られない(図-4(a))。一方で、海底の水温差とD0の変動の間には8月期、10月期で傾向が異なるものの、同調した変動が見られる(図-4(b))。このことから、濁度の上昇やこれに伴うD0の低下には海底直上での水温(密度)および実験区に流入する水塊密度が関連していると考えられる⁴⁾。10月期と8月期は、底層での水温勾配が大きい(成層が安定している)ために、海底直上での密度構造が変化し難い期間である。ただし、塩分については、8月期は32psu以下であり10月期に向かって1psu以上増加していくことから、9月には高塩分の湾外水が実験区に流入し海底直上の密度が大きく変化していると推定される。

(3) 泥温と海水温差で形成される海底水温勾配

10月期と8月期にはB+0.1mで水温が低かったのに対し、12月期では海水が泥温よりも低くなったためB+0.5mの水温との逆転が起こり海底で(B+0.1m)で水温が高い不安定な密度状態が形成されている

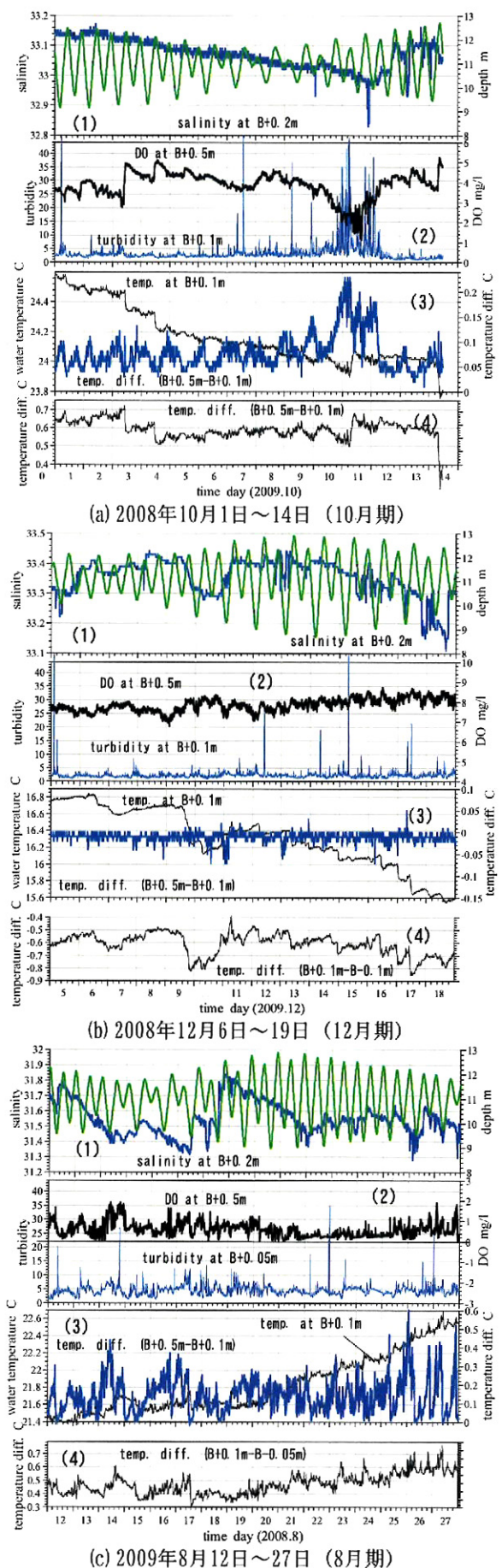


図-3 潮位変動と海底直上(海底+0.1mと0.5m)での濁度、D0、塩分と水温の経時変化

(図-3) ため、海底面から受ける浮力(負の水温勾配)によって濁質が浮遊しやすい。しかし12月期には海面での一次生産が小さいため海底には分解の進んだ有機泥が多く、含水比が低くなることで高濁度層は浮力の働く海底面近にのみ薄く発達していると考えられる。

8月期と10月期は常に泥温が低温で海水から泥内に熱が伝達する状態にあり、底層水は温度勾配的には安定な状態にある。水温場が安定している場合には濁質には浮力は働かず、濁質は海底の重い水塊の中に閉じ込められることになる。

(4) 潮汐によって引き起こされる海底層の湧昇

8月期の水温差は潮汐周期の変動を含んでおり、水温勾配がなくなった時にD0の低下があることから(図-4(b))、海田湾での貧酸素化には海底直上の重い水塊に閉じ込められた濁質の上昇が関連していることがわかる。下げ潮に伴う上層水の実験区からの流出(内部潮汐波あるいはエスチャリー循環)によって、底層の低水温塊が持ち上げられると、海底上50cmと10cmでの水温差が小さくなる。逆に、実験区へ湾外水が流入することにより底層の重い水塊は安定な状態に戻る。この機構により海底近傍で生じる水温差の変動(図-3)は説明することができる。したがって8月期には、10月期に比較して底層での成層が強い(塩分差が大きい)ことから、密度勾配に起因して底層水の湧昇(振幅)が高くなると考えられる。

(5) 海底層への高密度水塊の貫入

10月10～11日の濁度の上昇に伴うD0の低下は、底層水温の低下による海底水温勾配の形成に連動して生じていることから、濁度の上昇は低水温塊の底層への貫入が原動力となっていると考えられる(図-3(a)、図-4(b))。この現象は海底直上での水温勾配が10月に向かって小さくなること、10月期には太田川河口および瀬野川河口にある水塊の水温が低下するため、海田湾へは塩分が低く、水温の低い河口水塊が流入する機会が増加することが原因と考えられる³⁾。B+0.5mとB+0.1mの水温勾配の上昇は水温と塩分の低下と連動していることから濁度の上昇が密度貫入による可能性は高いと判断できる。河口域にある低塩分で低水温の水塊が実験区底層の高い水温場に密度貫入した場合には、周辺から熱の伝達によって濁質に浮力が生じることになる。低塩分水塊の浮力によって海底の濁質層が膨張し酸素の消費が活発になれば、河口系水塊の海底への貫入が底層水の湧昇を生起し、水温勾配の形成→濁度上昇→D0低下という一連の現象が説明される。

8月期は河川水温が高く、海田湾に流入する水塊の密度が軽いために、また、12月期には河川からの流出が少なく、低塩分で低水温の水塊が存在しない

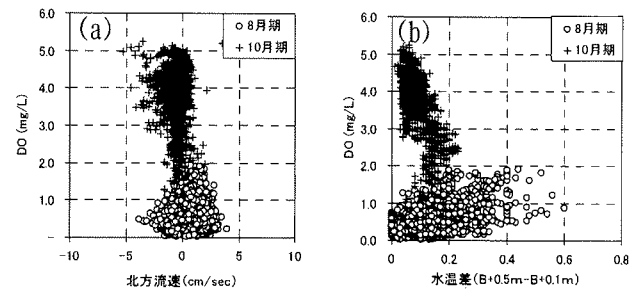


図-4 D0 (B+0.5m) と実験区海底流速 (B+0.2m) (a) および海底水温差 (B+0.5m-B+0.1m) (b) の関係。流速については流軸方向の北方成分を示した。

ために、湾外水が実験区海底に貫入する機会が少ないことから、本観測では貫入による濁度の上昇は観測されていない。

5. 海底高濁度層厚の推定

(1) 海底直上での高濁度層の挙動

図-5に2009年の8月期と2008年の10月期、12月期にST. 1内にあるS2での(a) 海底 (B+0m) と(b) 中層 (B+3m) に設置したセジメントトラップに捕捉された沈降泥のSS flux, IL が示されている。海底での値は3m×3mに配置された9個の捕捉泥の平均値である。

図-5より冬期には海底上3mで捕捉された有機泥は海底の1/100程度であるが、夏期には有機物の生産力が高いため、夏期には冬期の20倍程度の沈降量になること、②12月期の海底濁度は、8月期、10月期の1/2以下である(図-3)にも関わらず、海底では同程度の有機泥量が捕捉されていることがわかる。また、全季節を通して海底に沈降する有機泥のC/N比は15を超えており、分解の進んだ有機物、あるいはC/N比の大きな有機物が付着した有機泥が実験区に輸送され沈降していると考えられる。

海底での捕捉量が中層の5～100倍多いのは、海底に有機泥が浮遊する(高濁度で高塩分)層が発達していること、海底浮遊泥の移流が活発であることによると考えられる。有機泥が活発に移流するのは、新しく沈降した有機泥には密度の小さい有機物が堆積泥よりも多く含まれているために沈降泥が浮遊し易い(有効密度の低い)状態にあることが推定できる。ただし、冬期には4.(3)節に述べた機構によって冬期には濁度層厚が薄く、かつ濁質濃度が濃い海底浮遊泥層が存在するために、夏期と同程度の有機泥が捕捉されたことが理解できる。

(2) 季節的に変化する海底濁度層厚

センサーで捕らえた海底の10～20cm(8月期では5～15cm)の範囲では濁度が観測季節毎に大きく変化しているにも関わらず、海底上5cmの高さで捕捉されたSSの沈降量が各季節で変化が小さいのは、海

底直上に高い濃度で存在する濁質の層厚が季節によって異なっているためであると考えられる。海底で捕捉されたSS量（図-5）からも12月期には濁度を計測した深度（海底上10cm程度）より下層に高濃度の濁質が存在していることが推定される。これに対し、8月期と10月期には海底濁度層は12月期に比較して厚く、濁質濃度は薄いことが推定される。これらの原因は海底での水温勾配、濁質に含まれる有機物の性状と量が異なることであることは4. (3)、4. (4) 節で記述した。

図-6に8月期にB+0.05mとB+0.2mで測定された濁度の経時変化が示されている。海底層での塩分の変化から海底の薄い層に塩分による強い成層が形成されている（図-3）こと、観測期間中の5cm層と20cm層での濁度差が平均で2ppm程度（最大約10ppm）あることから、濁質は海底直上に存在する10cm程度の薄い層に高塩分水塊とともに濃い濃度で存在していることが予想される。

図-3 (a) と (c) の濁度から8月期には10月期よりも濃い濃度で、かつ、濁質層が数10cmの厚さで10月期よりも厚い状態で存在していることが推定できる。なお、海底濁度の小さい10月期にも捕捉量が多いのは、湾外水の貫入により10ppmを越える濁度の上昇が起こった時に（4. (5) 節 参照）、多量の懸濁粒子が捕捉されているためと推定できる。

(3) 海底での浮遊有機泥の輸送

図-7には2009年の8月期に実験区（ST. 1）の海底で捕捉された沈降泥のSS fluxの分布が示されている。図から、8月期の海底での有機泥捕捉量は湾口側で2倍程度多く（30～50 g/m²/d に対して50～95 g/m²/d）、湾口から湾奥に向って有機泥が運ばれていることが推定できる。図では示していないが、捕捉された有機泥のILは全地点で15～17%の範囲にあり、設置時に柱状採泥した底泥（図-2 (c)）よりも4～6%大きな値になっている。また、沈降泥では実験区の湾口側と奥側でIL値の差が小さいのに対し、堆積泥では湾奥に向ってIL値が高くなり沈降泥のIL値に近くなっていることから、沈降泥の一部は湾口側でトラップされなければ、浮遊状態が継続し、湾奥に輸送されたと推定される。

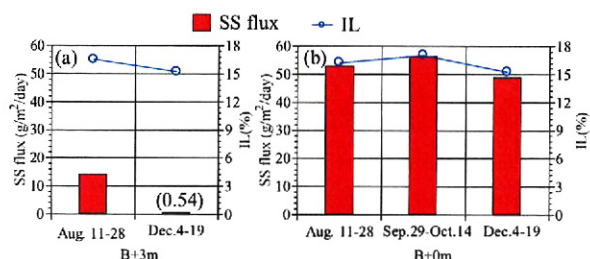


図-5 2009年の8月期と2008年の10月期、12月期にS2の海底（B+0m）と中層（B+3m）でセジメントトラップに捕捉された沈降泥の有機性状、SS flux, IL

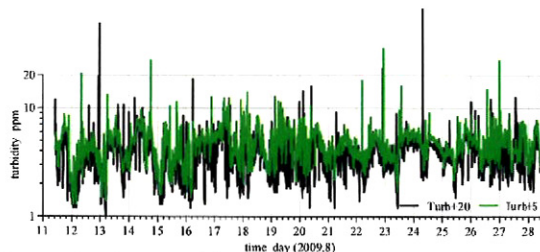


図-6 2009年の8月期の海底上5cmと20cmでの濁度変化

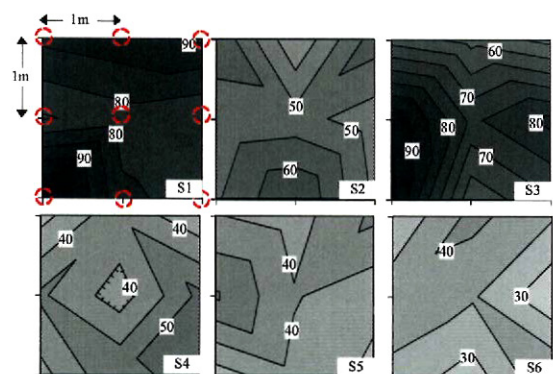


図-7 ST. 1における沈降泥のSS flux (g/m²/d) 分布

6. ヘドロ堆積を抑制するために必要な被覆層の施工厚

(1) 水平移流に対する必要高さ

海底に浮遊する高濁度層の厚さは夏期に最大となり、同時に測定した濁度プロファイルではその厚さは数10cm程度であった。図-8には8月期の海底での濁度と沈降泥量の測定概要を示している。セジメントトラップの開口部の高さは5cmであるから、海底で捕捉された有機泥は海底上5cm程度以上に浮遊する有機泥である。濁度計は5～15cm（B+5cm設置計）と20～30cm（B+20cm設置計）の範囲の濁質を捕らえている。設置期間中に測定された濁度（SS換算）の平均値はB+5cm設置計では10.3g/m³、B+20cm設置計では8.2g/m³であることから、海底の8g/m³程度の濁度層は海底上30cm程度まではある。海中（B+3m）のSS量の平均は3.2g/m³程度あり、濁度は海底上で数倍の値に増大している。

海底で捕捉された有機泥を代表する粒子（D₅₀ = 25μm）の沈降速度（1.3m/d）から推定されるSS（10g/m³）が1日に沈降する量13g/m²は、実際にセジメントトラップに捕捉された沈降量（68g/m²）の2割程度である。このことは沈降量の8割程度はセジメントトラップ開口部高さ（B+5cm）付近に浮遊しているか、開口部付近で発生する乱れによって沈降が加速されることを示している。海底面近傍で輸送される有機泥はセジメントトラップがなければ沈降せず浮遊状態が継続すると考えられる、しかし、有機泥は水平方向の流れ成分と鉛直方向の流れ成分をもっていることから、トラップの壁に衝突する機会が多く、衝突した有機泥が捕捉されていると考えられる。すなわち、海底で捕捉された有機泥の多くは

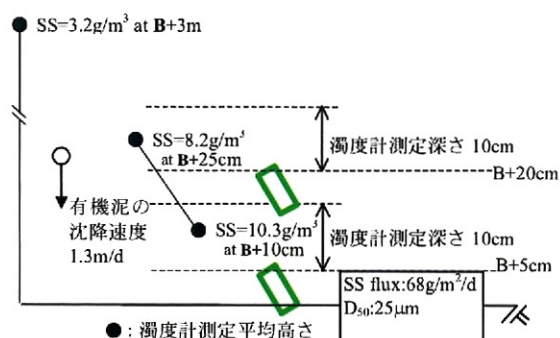


図-8 2009年8月期の海底での濁度と沈降泥量の測定概要

10cm以下の高さで輸送される海底直上に浮遊する高濁度層内にある有機泥と考えられる。

(2) 沈降量と石炭灰造粒物層内の間隙量変化

海底で捕捉された有機泥の水平移流する成分は湾口側に敷設する石炭灰造粒物層高さによって捕捉できるように設計されれば、海面から海底に沈降する有機泥は中層(B+3m)で捕捉された有機泥を沈降量として考えるのが妥当である。中層での沈降量が測定されたのは8月期(13.79g/m²/d)と12月期(0.54g/m²/d)のみであるが、平均沈降量を両期間の平均値で表せるとすれば、7.17g/m²/dとなる。石炭灰造粒物層の間隙率は40%程度であり、沈降する有機泥の分解がない場合に間隙が沈降泥によって満たされる時間は約75日/cmである。すなわち、実験区では石炭灰造粒物層内の間隙は1cmの有効間隙高さにつき75日程度の間、沈降泥を捕捉することができる。間隙内での分解が促進されれば、さらに捕捉可能期間を延ばすことができる。

(3) 必要施工厚

海面からの有機泥の沈降分を捕捉・分解し長期にわたって効果を持続できる間隙を形成する石炭灰造粒物層の形状を検討するための実証実験区を設計する。

海底での流速は平均2cm/s程度であるから、8g/m³の有機泥が13m/dで10cm沈降する間に約170m運ばれる。底層を水平移流してくる有機泥は移流間も沈降が継続するため湾口部側の石炭灰造粒物層の間隙によって水平移流してくる有機泥を捕捉できる構造とする。海底に沿う高濁質の移流を捕捉できる高さとして20cm、その高さを越えて移流する濁質の沈降分を捕捉するために必要な長さを200mとして設計する。ただし、20cm厚層を100m、10cm厚層を100mとして移流分を捕捉する。20cm層を超えて10cm層まで到達する移流有機泥は5割以下であり、10cm層100mの内、奥側50mに到達する機会は少ないと考えられる。また、石炭灰造粒物施工厚を底泥の巻き上げ抑制に必要な最低層厚5cm¹⁾および上記の10cm、20cmと比較し、石炭灰造粒物層の有機泥捕捉可能期間と最適施工厚を特定する(図-9)。

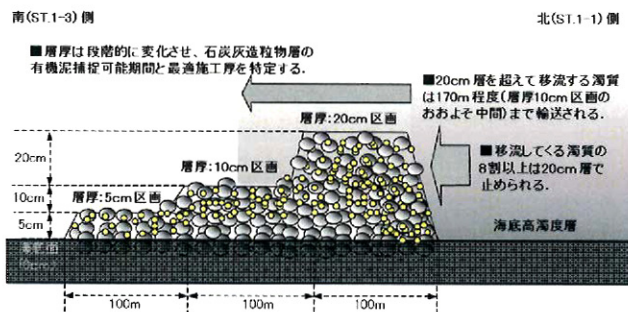


図-9 ヘドロ被覆の設計断面の概念図

7. おわりに

本論文では、実証実験を設計するために海田湾海底での水温、塩分、濁度、D0の連続測定結果と捕捉された沈降泥の量と性状を総合的に評価した。本成果を用いて有機泥を捕捉・分解し、長期にわたって効果を持続可能な石炭灰造粒物層の実証試験設計断面を決定した。以下に本設計断面とした根拠を示す。

- 1) 実験区には分解の進んだ有機物、あるいはC/N比の大きな有機物が付着した有機泥が実験区に輸送され沈降し、その一部は圧密堆積せず、浮遊可能な状態を維持しており、海底付近の水塊構造等の影響により濁質層の濃度や厚みが増加していることが予想される。
- 2) 海底への粒子の沈降は、海底付近の高濁質層の影響が大きく、冬期には海底上3mで捕捉された有機泥は海底の1/100程度、夏期には1/5倍程度の沈降量になる。
- 3) 捕捉された有機泥の沈降速度から、海底セジメントトラップに捕捉される有機泥の多くは海底上10cm以下の層に存在していると推定される。
- 4) 実験区に輸送される有機泥の沈降速度は1.3m/d程度であり、2cm/s流速場で有機泥が10cm沈降するのに約170m移流する。

参考文献

- 1) 今川昌孝・駒井克昭・日比野忠史・阿部 徹・西田芳浩：デルタ河川河口部に堆積する有機泥の分布特性，水工学論文集，第53巻，pp. 1447-1452, 2009.
- 2) 福岡晴美・日比野忠史・山本民次・斉藤直：石炭灰造粒物覆砂による環境修復効果-汽水域をフィールドとして-，海岸工学論文集，第56巻，pp. 1026-1030, 2009.
- 3) 今川昌孝・日比野忠史・首藤啓・西田芳弘：海田湾に堆積する有機泥性状と水質の変動特性，海岸工学論文集，第56巻，pp. 1036-1040, 2009.
- 4) 西田芳浩・川内清光・山本裕規・首藤啓・日比野忠史：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-，海洋開発論文集，pp. 407-412, 2009.