

デルタ河川河口部に堆積する有機泥の分布特性

CHARACTERISTIC OF DISTRIBUTION OF ORGANIC MUD AT DELTA RIVER MOUTH AREA

今川昌孝¹・駒井克昭²・日比野忠史³・阿部 徹⁴・西田芳浩⁵

Masataka IMAGAWA, Katsuaki KOMAI, Tadashi HIBINO, Toru ABE and Yoshihiro NISHIDA

¹学生会員 広島大学博士課程前期 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 博(工) 広島大学助教 大学院工学研究科 (同上)

³正会員 博(工) 広島大学准教授 大学院工学研究科 (同上)

⁴正会員 工修 中国地方整備局 太田川河川事務所所長 (〒730-0013 広島市中区八丁堀3番20号)

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所長 (〒730-0029広島市中区2-10)

Transport processes of organic mud in delta river mouth area are investigated based on observation results of properties and distributions of organic mud. The re-suspended matter which is transported to Tenma River with tidal intrusion of seawater is generated at shallow and steep area, although it is not directly deposited to riverbank. Transported organic mud during flood tide above mean sea water level contains composed organic matter and deposits to the riverbank in Tenma River. Most of the organic mud deposited at the delta river mouth bottom is generated from decomposed mud repeating deposition, re-suspension and transport processes.

Key Words: tidal River, Organic mud, Ignition loss, C/N ratio, Soil density, Grain size distribution

1. はじめに

広島湾奥に位置する広島港には太田川放水路、天満川、旧太田川、元安川が流出、海田湾には猿候川、瀬野川が流出しており、淡水が滞留する場が形成されている。天満川、旧太田川、元安川、京橋川、猿候川の5河川はあわせて市内派川と呼ばれており、本論文では市内派川と太田川放水路をあわせてデルタ河川と呼ぶ。広島湾～市内河川では広範にわたって有機泥がヘドロとして堆積している。デルタ河川では約4mの潮汐変動があるため、河口から約10km離れたデルタ扇頂の祇園においても満潮時には26程度にまで塩分が上昇する。広島湾～デルタ河川間では潮汐に伴って有機泥が往来しており、デルタ河川に堆積するヘドロの多くは広島湾奥域に堆積した履歴を有している。河口域海底に沈降した有機泥は潮流等の擾乱により再浮上し、海水の遡上とともに輸送され、河岸に沈降してヘドロとして堆積していることがわかっている。本研究では海底で沈降し、再浮遊して海側から輸送された陸起源の有機物を含む有機泥についても海域から輸送される有機泥として扱っている。

有機物は海水と混合すると微細な土粒子と結合しやすく、細粒土粒子(75 μ m以下の土粒子)と有機物の複合体を形成している。細粒土粒子には有機物が多く吸着するために細粒分の多い堆積泥では強熱減量の値は大きく

なるが、細粒分量に対して一意的に有機物量が決定されるものではない。図-1には、閉鎖性の強い松永湾、海田湾、広島湾海底泥、および太田川放水路河岸干潟、尾道・糸崎造成干潟の地盤材料の細粒分含有率と強熱減量値との関係を示している。広島湾海底泥は90%以上が75 μ m以下の細粒分で構成されており、有機物を10～20%含有している。図中の実線は細粒分が少ない干潟地盤と砂分が含まれない海底泥での強熱減量の最大・最小値を結んだものである。

閉鎖性の強い海田湾、松永湾には広島湾内の堆積泥よ

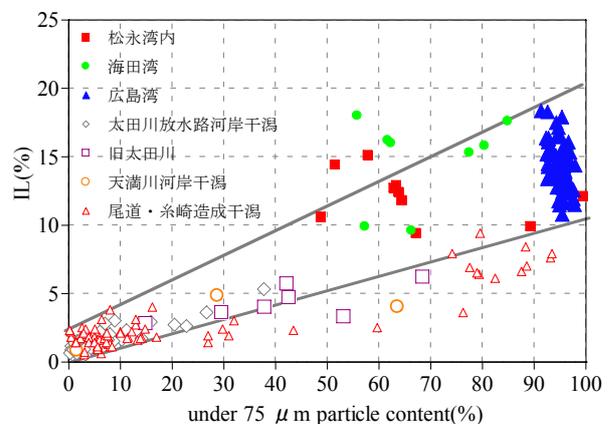
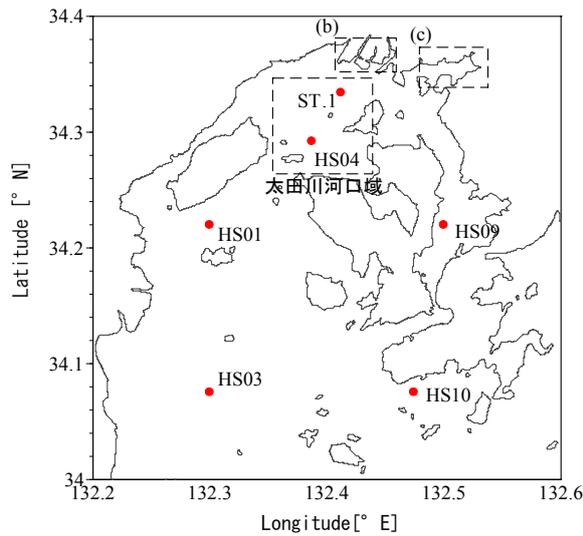
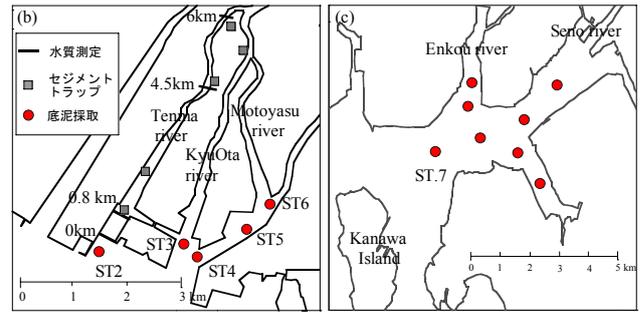


図-1 75 μ m以下の粒子の含有率とILの関係



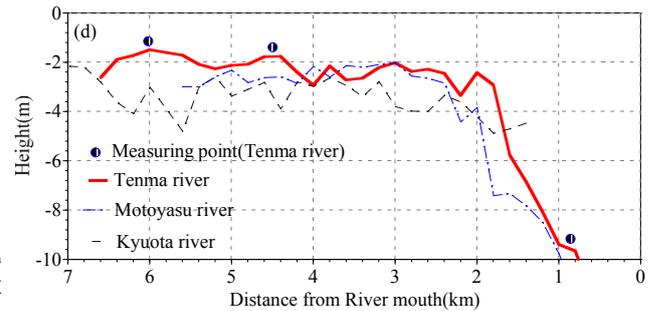
(a) 広島湾調査地点

(河川水が滞留するST.1とHS04付近を太田川河口域として解析している。破線枠(b)は市内派川, (c)は海田湾, 他の調査地点を広島湾域として区分した。セジメントトラップはST.1に設置した。)



(b) 市内派川河口域調査地点

(c) 海田湾調査地点



(d) デルタ河川の最深部河床高の縦断分布

図-2 広島湾奥部(デルタ河川河口部)の地形と調査地点

りも含水比(水分保持能力)の高い有機泥が存在している。一方、尾道・糸崎の造成干潟では細粒分の含有率に対する有機物含有量が低く、干潟地盤材料に含まれる有機物量は広島湾内の堆積泥に比較して少ない。干潟のように有機物の分解率が高い場では細粒分に付着する有機物も分解されやすく、シルト以下の細粒分に付着する有機物量は堆積場の生物環境に依存するために細粒分の含有量に対する含水比(水分保持量)が少なくなっている。分解が進んだ有機物にはPON(有機懸濁態窒素)に比較してPOC(有機懸濁態炭素)が多く含まれている(POCとPONのモル比であるC/N比が大きくなっていく)ことから有機物の分解度はPOCとPONの比によって表すことができる。堆積域の環境によって有機泥に付着する有機物の分解状態が異なっており、有機泥の性状を分析することで有機泥の履歴を推定できる可能性がある。ちなみに、有機泥に含まれる有機物の分解の最終形態として考えられるフミン質に含まれるPOC, PONは重量%で50~67%, 1.5~3%である。その他の含有元素として酸素(28~45%), 水素(3~6%), 硫黄やリン(1%以下)が含まれている。分解が終了したと考えられるフミン質のC/N比は20~50程度である。

本研究の目的は、デルタ河川~広島湾に分布する有機泥の性状(有機物含有量, 有機物の分解度)から湾内海底と河口域, および河岸に沈降・堆積する有機泥の関連性について明らかにすることである。このためデルタ河川に遡上する有機泥の輸送形態および広島湾, 太田川河口域, 海田湾~市内派川河口域における海底および河川

干潟の堆積泥の含水状態や性状(有機物含有量, 有機物の分解度)に着目し、河口域に分布する有機泥の有する特性について検討を行った。

2. 輸送・堆積される有機泥の採取調査の概要

(1) 有機泥の輸送の考え方

有機泥の起源は安定同位体比によって判別が可能であると言われている。一般に沿岸堆積有機物に含まれる安定同位体比は、 ^{13}C と ^{15}N ともに海成有機物の含有量が多いほど値が上昇し、陸生有機物の含有量が多いほど値が低下する。Takaiら¹⁾によると太田川河口域海底に堆積する有機泥に含まれる ^{13}C と ^{15}N の安定同位体比は22.2‰程度の低い値を示すことが報告されており、 $\delta^{13}\text{C}$ の低い陸域起源の有機物が堆積していると推定している。本研究で扱う広島湾~デルタ河川間では、湾奥河口域で堆積した履歴を持つ有機泥が海水の遡上により往来しているため、安定同位体比等によって一律に有機物の起源を推定することは適当でないことから、本論文では有機物の性状変化に焦点をおいて有機泥の輸送について検討する。河道内に輸送される有機泥量は、河口域海底に堆積する有機泥の分解状態に依存すると考えられる。そこで、海底堆積泥と海域から輸送され河岸に堆積する有機泥の特性(粒度や有機物構成比など)を比較し、それらの関連を分析することで有機泥の輸送形態について考察する。

図-2に広島湾奥部(デルタ河川河口部)の地形と調査地点を示した。ここでは、図に示すように湾奥河口域と

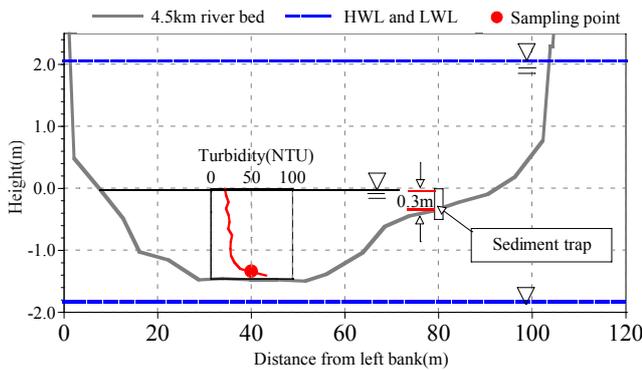


図-3 天満川4.5km地点における横断面図，セジメントトラップの設置高さ，および河川を遡上する濁質分布（2008年9月16日大潮上げ潮時の観測値）

その他の広島湾内域に区分し，湾奥河口域はさらに (a) 太田川河口域（太田川から流出した河川水が滞留するST.1とHS04付近），(b)市内派川河口域，および(c)海田湾（瀬野川と猿候川の河口域）に区分されている。次節では，海底および河岸に沈降，堆積する有機泥の特性を明らかにするために，海底と河岸に堆積する有機泥の採取，海水中に浮遊する有機泥（沈降泥）の採取，および水質の連続測定の方法について述べる。

(2) 海域～河岸での沈降泥・堆積泥の採取調査の概要

図-2 (a)に示す地点のうち，ST. 1とHS09においては2006年の6月～11月に計5回，HS01～HS09では2007年の7月と10月の2回，市内派川河口域，海田湾においては2008年の7月に海底泥の採取が行われた。

海底泥は $\phi 12 \times 60 \text{cm}$ のアクリルパイプを泥内に重力貫入し，不攪乱採取した。採取された高さ30cm程度のコアサンプルは表層から2cm毎にスライスした後，各層について分析を行った。また2007年と2008年には同地点においてエクマンバージュ型採泥器（採泥面積：15cm \times 15cm）によって海底泥を採取した。このサンプルは泥深0～10cmの値を代表したものであるため，不攪乱採取されたコアサンプルの表層～泥深10cmの平均値と比較することができる²⁾。一方，市内派川河岸の干潟では，セジメントトラップ（ $\phi 10 \times 70 \text{cm}$ の円筒）が，上端開口部が底面上30cmになるように埋設された。太田川河口域（ST.1）でのセジメントトラップは $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ の円筒が用いられ，海底面上1～9mにおいて2mごとに6個係留された。採取された堆積泥および沈降泥は含水比，強熱減量(IL)，粒度分布，POC，およびPONが測定された。POCとPONはCHNS/O分析装置（パーキンエルマー社製2400 II型），粒度分布はレーザー回折式粒度分布測定装置（SHIMADZU社製，SALD 2000-J）を用いて分析が行われた。

(3) デルタ河川に輸送される濁質調査の概要

図-2(d)に示す測点で2007年8月～10月に天満川に遡上

する海水の塩分と濁度の連続観測を行った。塩分計（アレック電子社製Compact-CT），濁度計（アレック電子社製Compact-CLW）は各断面での最深部付近の河床上5cmに設置された（図(d)）。4.5km地点では図-3に示すように河床での遡上濁質を採取，測定した。なお，この地点ではセジメントトラップは平均潮位面以上にある沈降泥を捕捉できるように設置した。採取された河川水に含まれる濁質（河床遡上泥）およびセジメントトラップに捕捉された懸濁物質（沈降泥）は2.（2）節と同様の分析が行われている。

3. 湾奥河口域に堆積する有機泥の物理・化学特性の把握

広島湾海底には表層含水比250～600%，有機物含有量10%以上の有機泥が堆積している。広島湾内域海底には含水比が500%を越える浮泥層が形成されている。本章では，広島湾内域の堆積泥と太田川河口域，海田湾，市内派川河口域の堆積泥およびセジメントトラップ捕捉泥の性状を比較し，河口部周辺での有機泥の特性とその分布特性について検討を行う。

(1) 広島湾海底に堆積する有機泥の保水特性

有機泥の輸送に関連する堆積泥の巻き上がり量は堆積状態，特に含水比に依存することがわかっている。有機物含有量が多い場合，含有される有機物が未分解である（C/N比が小さい）場合に堆積泥の含水比は多くなる³⁾。

図-4には広島湾内域と湾奥河口域（太田川河口域，市内派川河口域，海田湾）の海底から採取された有機泥の(a)含水比と強熱減量，(b)含水比とC/N比の関係が示されている。湾奥河口域海底に堆積する有機泥（底泥）の含水比は200%未満であるのに対し，湾内域底泥では250～650%程度であること，有機物含有量は湾奥河口域では7～16%，湾内域では10～20%程度であることがわかる。

湾内域での海底泥の含水比分布範囲が広いのは広域にわたる調査結果であり，水深，閉鎖度，河川水の拡散状態によって，溶存酸素量（分解の容易性），懸濁物質の集積状態，砂分の含有量が異なるためである。湾奥河口域の底泥に含まれる有機物の分解度は広島湾内域の底泥に比較して高く，有機物含有量は少ない傾向にある。湾奥河口域と広島湾内海での底泥の含水比が異なる主な要因は，湾内海底では一次生産起源の新鮮な有機泥の沈降量が多いためと考えられる。また湾奥河口域では湾内域に比べ，砂分を数%含むために圧密が進むことも含水量が少なくなる要因である⁴⁾。湾内域の海底泥に比べ海田湾，市内派川河口域の海底に堆積している有機泥の含水比は100～200%程度低く，浮泥層，高濁度層（含水比が500%を超える浮泥層）は形成されていない。さらに広島湾内域の海底泥でC/N比が10～11程度であるのに対し，湾奥河口域においては12～23の値を示していることから，

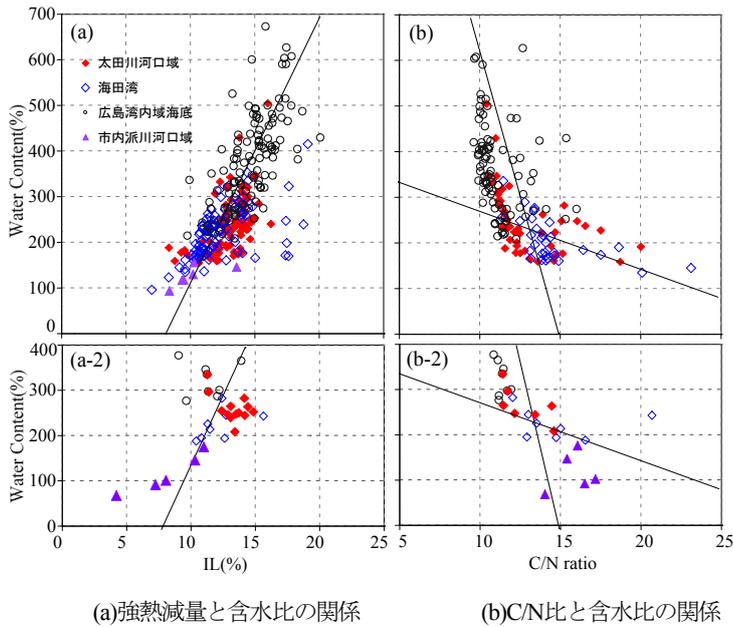


図-4 広島湾奥域海底に堆積する有機泥の保水特性

((a-2), (b-2)はエクスマンバージュ採取泥(凡例は(a)に同じ), 図中実線は柱状採泥との比較するための補助線)

湾奥河口域では湾内域に比較して分解の進んだ保水性の小さい有機泥が堆積する環境にあることが推定される。

(2) 太田川河口域と海田湾での有機泥の堆積状態

図-5には太田川河口域(ST.1), 市内派川河口域(ST.3)と海田湾(ST.7)での海底泥表層20cmの含水比, IL, ORP, およびC/N比のプロファイルが比較されている。採泥時, 湾奥河口域で赤潮が発生しており, 海田湾においては海面表層で30~40mg/l, 海底付近においても20mg/l以上の溶存酸素が存在しており, 堆積泥直上水の溶存酸素は過飽和の状態であったが, 海田湾や天満川河口に堆積する有機泥のORPの値が負の値を示していることから海底泥内は太田川河口の有機泥の堆積状態と比較して高い還元状態にあることがわかる。詳しくみると, 天満川河口では海田湾よりも表層含水比が低く, 有機物含有量も少ないが, これは河口域での堆積泥には砂が含まれているためであり, 細粒分の性状に関しては海田湾と類似している。内湾域海底泥にはILとC/N比には一意的な関係はないのに対し, 図-6に示した市内派川堆積泥, 沈降泥, 海田湾堆積泥では, 有機物含有量が少ない堆積泥に含まれる有機物の分解度は高く, ILとC/N比は負の相関関係にある。海田湾, 市内派川河口域に堆積する有機泥の多くは一次生産起源の有機泥ではなく, むしろ沈降, 巻き上がりの繰り返しにより分解の進んだ有機物が堆積したものと考えられる。

(3) デルタ河川河口部に輸送される有機泥の特性

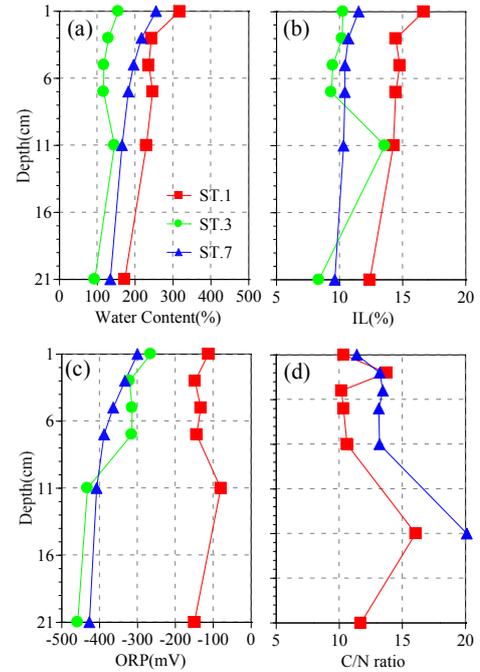


図-5 堆積泥の物理化学性状の鉛直分布
(a) 含水比, (b) IL, (c) ORP, (d) C/N 比)

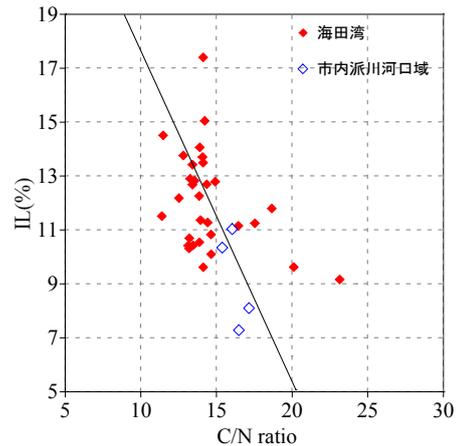


図-6 海田湾と市内派川河口域堆積泥のILとC/N比の関係

図-7に海水位と天満川河口から6.0km, 4.5km, 0.8kmの地点において2007年9月28日~10月1日間の塩分, 濁度の連続測定結果(測定間隔10分間)が示されている。0.8km地点は塩分に代えて上流(矢口第一)での河川流出量が示されている。天満川の6.0kmと4.5km地点において, 上げ潮時に塩分の上昇にともなって濁度が上昇しており, 海水の遡上とともに濁質が下流部から輸送されていることがわかる。水深が約10mを超える0.8km地点では濁度の上昇はないことから海水の濁質の巻き上がりは0.8kmより上流の水深の浅い場で起こっていると考えられる。さらに濁度の分布は図-3に示すように, セジメントトラップの上面の水位以下の水深(河床面近傍)でピークを迎えており, 上げ潮期初期に遡上する濁質と平

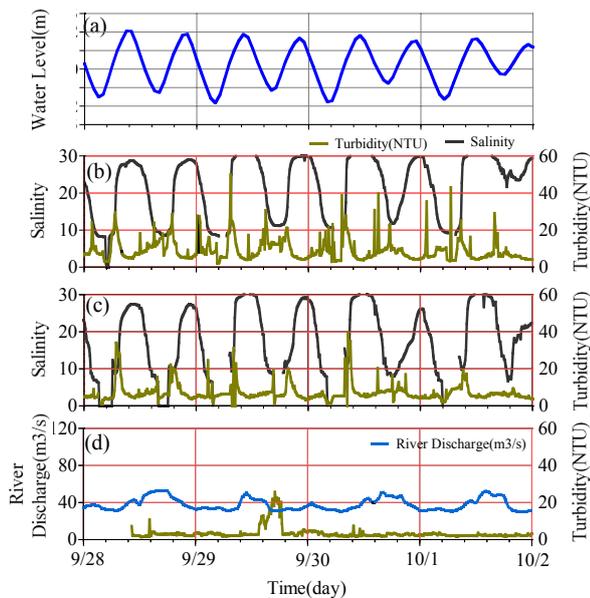


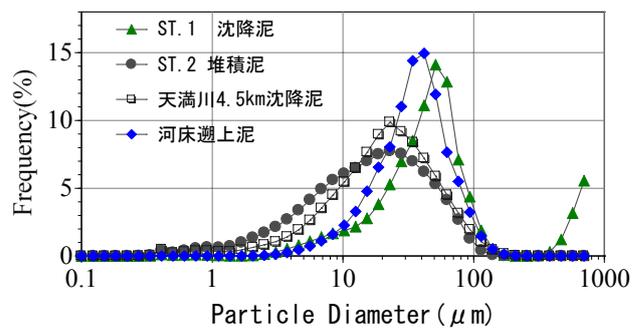
図-7 (a) 水位, 天満川河口から(b)6.0km, (c)4.5km, (d)0.8km地点における塩分と濁度の経時変化 (0.8km地点では塩分の代わりに太田川分派前の河川流量を示している)

均潮位面以上の水深で捕捉された懸濁物質は輸送形態の異なるものであることがわかる。図-8は天満川4.5kmでの河床遡上泥と同地点での沈降泥, 天満川河口 (ST.2) での堆積泥, および太田川河口域 (ST.1) の表層で捕捉された沈降泥の粒度分布, IL, C/N比を示している。河床遡上泥の特性は同地点でセジメントトラップに捕捉された沈降泥に比較して, シルト~細砂等の粒径の大きな粒子の割合が多く, 同程度の有機物を含んでいることがわかる。河床遡上泥の粒度分布は太田川河口域ST.1 (平均水深15m) の表層で捕捉された沈降泥に粒径分布は類似しているが, 数倍の有機物を含み, 有機物の分解度が高くなっている。天満川4.5km河岸で捕捉された沈降泥は河床遡上泥の粒度分布より天満川河口 (ST.2) 堆積泥に近い粒度分布であるが, 有機物含有量は2倍程度で, C/N比は小さい傾向にある。

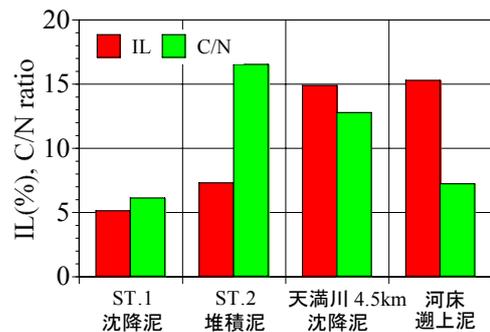
(4) 有機物の付着と懸濁粒子の輸送との関係

図-9には2005年に太田川河口域 (ST.1), 2003~2005年に市内派川河口域 (旧太田川, 天満川) で採取された沈降泥, 2005~2007年に広島湾内域, 太田川河口域, および2008年に天満川河口で採取された堆積泥の(a)C/N比と中央粒径 (D_{50}), (b)ILと D_{50} の関係を示している。

市内派川に沈降する有機泥の D_{50} は地点で採取された有機泥よりも大きく, ILは5~20%の範囲に分布している。さらに未分解の有機物が多く含まれており, ILが大きい粒子は肥大化していることがわかる。西村ら⁴⁾は, 広島湾内域の堆積泥に含まれる有機物の密度は1.5~1.8g/cm³であり, 2.65g/cm³の土粒子に有機物が9~12%程度付着することで有機泥密度は2.45~2.57g/cm³になること, 太田川河口で沈降する懸濁粒子 (有機泥) は分解度

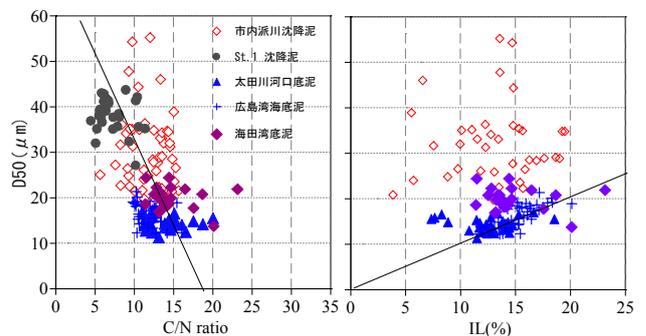


(a) 粒度分布



(b) IL, C/N比

図-8 沈降泥(太田川河口域表層(ST.1)と天満川4.5kmでのセジメントトラップ捕捉泥), 天満川河口(ST.2)堆積泥, および河床遡上泥の粒度分布と性状



(a) C/N比と D_{50} の関係

(b) ILと D_{50} の関係

図-9 沈降泥と堆積泥の有機泥の性状と D_{50} の関係

が様々に異なった有機物が含まれ, 有機物は10~30 μm の粒径粒子に相対的に多く含まれていることを示している。微細土粒子に付着する有機物は懸濁粒子の粒径(形状)や粒子密度に影響を及ぼす主要因であり, 有機物が付着し, 沈降し難くなった懸濁粒子が海水とともにデルタ河川に輸送されていることがわかる。

(5) 河口域での有機泥の分布と市内派川への有機泥の輸送

河口域に堆積する有機泥と天満川の遡上泥と沈降泥の性状を比較することで河道への有機泥の輸送について考察する。懸濁粒子の河道内への輸送形態は付着する有機

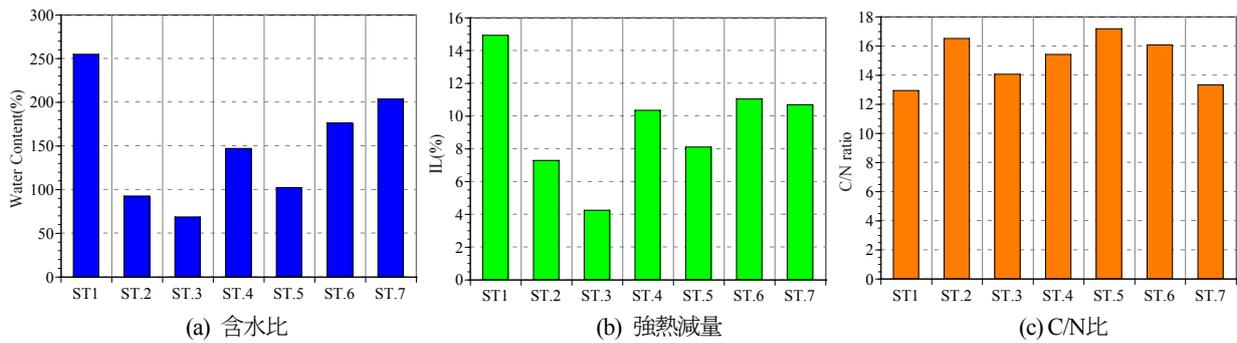


図-10 湾奥河口域（太田川河口域(ST. 1), 市内派川河口域(ST. 2~ST. 6), 海田湾(ST. 7)）に堆積する海底泥の分布特性

物の量と分解度（一次生産の場合）に依存することになる。図-8にも示したように河床遡上泥は90%以上の細粒分で構成されており、ILは10%以上、C/N比が10以下の比較的新鮮な有機物を含んでいる。有機物の付着により懸濁粒子の密度が低下することで土粒子よりも浮遊しやすくなっている。したがって、保水能力の高い未分解の有機物を多く含む有機泥ほど緩い状態で堆積し、巻き上がりを容易にさせる。図-10に広島湾奥河口域（太田川河口域～市内派川河口域～海田湾口部）に堆積する海底泥の分布特性を示した。湾奥河口域に堆積する有機泥の含水比は内湾域に比較して小さく、この傾向は河道に近いほど顕著に現れている。強熱減量は含水比（粒度分布）に対応しており⁴⁾、有機物分解度は市内派川河口域で高いことがわかる。ただし、ST. 2と3での1mm以下の粒径の含有率は70%程度であり含水比、ILが低いのは堆積泥内の細砂分の含有量が高いこととの関連も強い。これらの傾向は広島湾奥河口域に堆積する有機泥の性状が、河道からの距離や河川流出量と関連した分布特性を有していることを示しており、有機泥の輸送形態との関連が強いことが予想される。

4. おわりに

海水の遡上によりデルタ河川に輸送される有機泥の性状と太田川河口域、海田湾、市内派川河口域、広島湾内域の海底に堆積する有機泥の性状と分布特性から以下のことが明らかとなった。

(1) 広島湾内域の海底泥には一次生産起源の有機物が多く含まれているため保水能力が高く、高含水比の浮泥層が形成されているのに対し、湾奥河口域に堆積する有機泥は分解の進んだ有機物が多く含まれており数100%含水比が低い状態で堆積している。湾奥河口域に堆積する有機泥の多くは一次生産起源の有機泥ではなく沈降・巻き上がりが繰り返されることによって分解の進んだ有機泥が多く堆積している。

(2) 天満川には海水の遡上とともに濁質が下流部から輸送されている。輸送された濁質は海水の遡上によって地形勾配の大きい水深の浅い場で巻き上がったものであることが推測された。

(3) 天満川河岸に輸送・堆積される有機泥と河床を遡上する有機泥は土粒子径、有機物性状（有機物含有量、分解度）が異なっている。河川水位が平均潮位面以下の上げ潮時に遡上する水塊によって運ばれる有機泥には未分解の有機物が多く含まれており、平均潮位面を超える河川水位にある水塊によって運ばれる浮遊泥には分解の進んだ有機物を含む有機泥が多く存在している。この有機泥が河岸に沈降・堆積されることが推定された。

(4) 広島湾奥河口域に堆積する有機泥の性状は河道からの距離、河川流出量に関連した分布特性を有していることから湾奥河口域（市内派川河口域～太田川河口域、海田湾）では有機泥が堆積状態にあるのではなく、沈降・輸送・堆積を繰り返しながら循環していることが予想される。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（代表者：岡田光正，課題番号：17201018）による助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Takai N, Onaka S, Ikeda Y, Yatsu A, Hoshika A, Carbon sources for demersal fish in the western Seto Inland Sea, Japan examined by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analyses. *Limnological Oceanography* 47, 730-741
- 2) 今川昌孝, 駒井克昭, 日比野忠史, 松永康司, バケツ型採取器で採取された海底泥の泥質特性, 第60回土木学会中国支部研究発表会, CD-rom, 2008.
- 3) 今川昌孝, 日比野忠史, 駒井克昭, 松永康司: 間隙水浸透場における底泥の巻き上がりに関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻(2), pp.1011-1015, 2007.
- 4) 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, Vol62, No.4, pp348-359, 2006.
- 5) 西村尚哉, 駒井克昭, 今川昌孝, 日比野忠史, 有機懸濁物質の形成に関する基礎研究 -有機物の付着特性-, 海岸工学論文集, 第55巻(2), pp.1056-1060, 2008.

(2008. 09. 30受付)