

# 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 -

## Studies on Formation of Suspended Organic Matter - Adsorption Characteristics of Organic Matter -

西村尚哉<sup>1</sup>・駒井克昭<sup>2</sup>・今川昌孝<sup>1</sup>・日比野忠史<sup>3</sup>

Hisaya NISHIMURA, Katsuaki KOMAI, Masataka IMAGAWA and Tadashi HIBINO

For evaluating the ecology in the Seto Inland Sea, it is important to estimate properties and adsorption characteristics of the organic matters included in the sediment. The authors have studied the adsorption to soil particles and water retention characteristics of organic matter by the grain size distribution, water content, IL and element contents of the sediment obtained from Hiroshima Bay and delta region. Additionally, the grain-size that the organic matters tend to adsorb was examined by a settling experiment using the particle size analyzer. It was estimated that the particle density of the organic matter is 1.5~1.8g/cm<sup>3</sup>. The ratio of organic matters included in the fine particles increase with the biodegrading.

### 1. はじめに

広島デルタを流れる太田川の水位は潮汐変動をしており、海岸線から約10 km 離れたデルタ扇頂の祇園においても満潮時には26 psu 程度まで塩分濃度が上昇している。河口（湾奥）域に堆積した有機泥は再浮上し、海水の遡上とともに河川に輸送され沈降し、河岸にヘドロとして堆積していると考えられる。

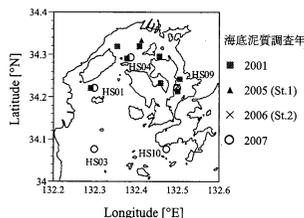
広島湾奥部海域海底表層には、栄養塩を多く含んだ含水比250~600%程度の底泥が堆積している。特に、湾奥部の海底表層数 cm では、有機懸濁物質が海水中で分解しきらずに沈降した比較的新鮮な状態の有機泥が非常に緩い堆積状態の浮遊泥層（550%以上の含水比状態の浮遊状態にある有機泥）を形成している。海底に形成された浮遊泥層から巻き上げられた有機泥が広島デルタに再輸送されている（日比野, 松本, 2006）。有機泥の浮遊（間隙水の流れによる膨潤）状態が巻き上がりや掃流、再沈降の形態に影響を及ぼすことから、本研究では有機物がどの程度の粒径の土粒子に付着し、どの程度の粒径粒子を形成（土粒子と有機物の付着形態）するのか、有機物の分解に伴って、どのように性状（密度、粒径）を変化させるのかについて検討した。

### 2. 海底泥質調査と沈降物捕集調査の概要

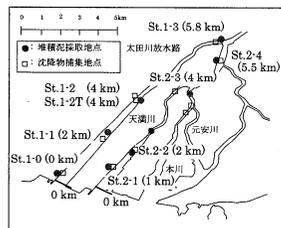
海底や河川干潟に沈降、堆積する有機泥の性状を明らかにするために、広島湾、太田川干潮域に堆積する有機泥および河川に運ばれ沈降する有機泥を採取し、その性

状を分析することによって有機泥の構造（有機物がどの粒径粒子に付着し、どの程度の密度、粒径粒子を形成するのか）について検討した。図-1には堆積泥採取および沈降物捕集地点（広島湾および太田川感潮域）を示す。海底泥は図-1(a)に示す15地点でφ12×60 cmの円筒を泥内に重力慣入して不攪乱採取された。凡例は採取された年を示す。不攪乱採取された海底泥は表層から2 cm 毎に分割採取された。太田川感潮域における河岸は表層（0~5 cm）に堆積する有機泥を採取した。

また、海域から輸送される有機泥の性状分析は図-1(b)に示す太田川感潮域に設置したセジメントトラップに捕捉された沈降泥を対象とした。河川干潟においてセジメントトラップはφ10×70 cmの円筒を用いて、上端が底面上30 cm になるように埋設されている。



(a) 広島湾地形図と観測点  
(2007年度のみ図中に観測地点名を記す)



(b) 太田川干潮域での観測点 (kmは河口からの距離)

図-1 広島湾地形図と観測点

1 学生会員 広島大学 大学院工学研究科  
2 正会員 広島大学助教大学院工学研究科  
3 正会員 博(工) 広島大学准教授大学院工学研究科

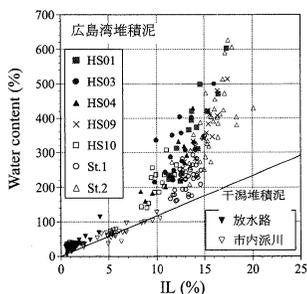
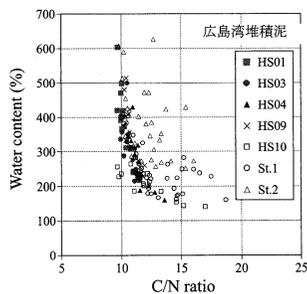
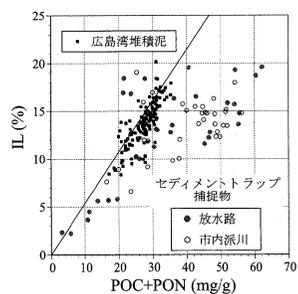


図-2 堆積泥の含水比と IL の関係

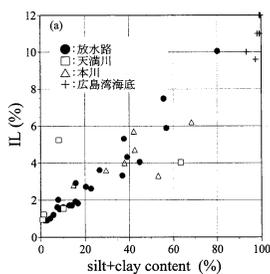


(a) C/N 比と含水比の関係

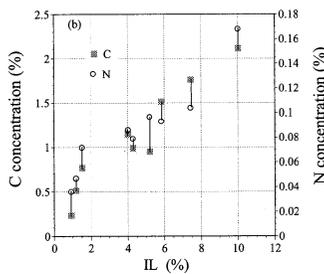


(b) POC+PON と IL の関係

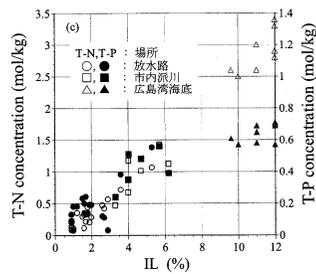
図-3 海底泥の POC, PON と含水比, IL の関係



(a) 細粒分に対する強熱減量値



(b) 河川堆積泥の炭素(C), 窒素(N)含有量



(c) IL に対する T-N, T-P

図-4 太田川放水路, 市内派川干潟および広島湾海底に堆積した有機泥に含まれる栄養塩(元素)の特性

採取された堆積有機泥は含水比, 底泥密度, 強熱減量 (IL), 粒度分布, POC, PON, Chl-a, セジメントトラップで捕集された沈降泥では粒度分布, POC, PON, Chl-a が測定された。2004年以降は各上記に併せて各試料を乾燥させ粉末状にし, CHNS/O 分析装置 (パーキンエルマー社製 2400 II 型) を用い, 窒素 (N) と炭素 (C), 水素 (H), 硫黄 (S) の元素組成を測定している。これらの分析結果から海底泥, 河岸堆積泥および河岸沈降泥の特性を把握し, 海底泥の膨潤, 沈降等の物理現象に及ぼす懸濁物質に付着する有機物の動きについて考察した。

### 3. 海底泥質調査と沈降物捕集調査結果

#### (1) 海底および河岸干潟に堆積する有機泥の保水能力

図-2~4には広島湾と太田川市内派川河岸で採取された堆積泥の有機物の含有状態が示されている。図-2には IL と含水比の関係, 図-3には POC, PON と含水比, IL の関係, 図-4には有機泥に含まれる栄養塩(元素)の特性が示されている。図-4(b)には C と N が同値軸線上にあるときに C/N 比が13.9となるように C, N の値軸が設定してある。図中に縦線で結ばれた値が同サンプルの結果である。IL が2%以下の堆積泥は砂干潟で採取されており, 図-4(b)の C と N の関係から IL が4~8%の泥干潟の堆積と比較して新鮮な有機泥が砂干潟に堆積していることがわかる。有機物含有量の多い海底泥の含水量が高いことは知られているが, 河岸干潟に堆積する土砂に

おいても同様の傾向があり, 河岸堆積泥の IL~含水比関係には線形関係が見出される。ただし, 海底泥の有機物含有量は数倍以上, 含水量は干潟堆積土砂の線形関係(図中の実線)よりも2~3倍程度多くなっている(図-2)。

保水能力は無機物と比較して有機物含有量の多い堆積泥で高いこと(図-2), 有機物量はシルト, 粘土分の含有量と共に増加していく(図-4(a))ことから, 有機物はシルト, 粘土(75 μm 以下)の微細土粒子に多く付着していることが理解できる。以上のことは, 75 μm 以下の細粒土粒子に有機物が付着し, 細粒分が保水能力を高くしている(微細粒子が水分を保持する)ことを示している。海底泥では IL に対する含水比のバラつきが大きくなっている(図-2)が, 図-3(a)に示すように C/N 比の小さい有機泥において含水比が高いことから, 有機泥の持つ保水能力は有機物の分解度(C/N 比を指標)にも依存していることがわかる。すなわち, 有機泥は有機物の分解(C/N 比の増大)とともにその形状が単純化することで, 水分の保持能力が低下していくと考えられる。さらに, 図-3(b)に示すように, IL に対する POC+PON の関係は河川干潟で捕捉された沈降物に比べて海底泥は強い線形関係があることから, POC, PON が有機物中の構成要素として支配的であることが分かる。

また, 図-4(b)では C, N 含有量とも IL の増加に伴って線形に増加しており, 有機物量は POC, PON 量から推定できる可能性がある。これに対し, T-N/T-P 比は

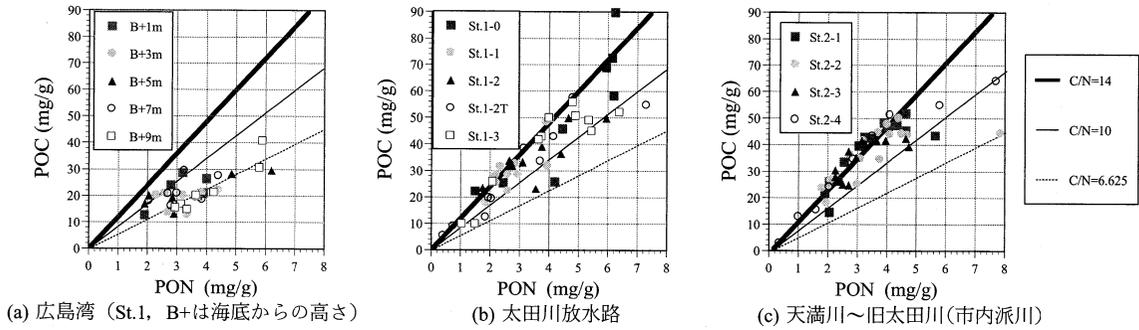


図-5 セジメントトラップ採取泥の懸濁態炭素と懸濁態窒素の関係

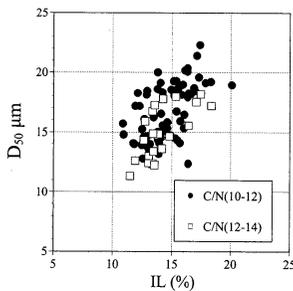


図-6 D<sub>50</sub> と IL の関係

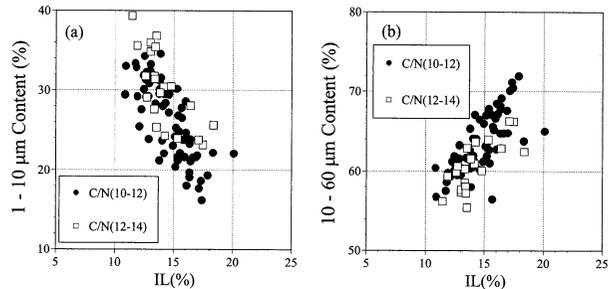


図-7 有機物が付着しやすい土粒子径

有機物量が多く (ILが8以上) になると2倍程度の値になっている。ちなみに、広島湾海底泥には有機物含有量が大きく、T-P含有量は有機物量に対するバラつきが大きくなっている (今川ら, 2008)。

(2) 河岸に輸送され、沈降する有機泥の特性

図-5は広島湾と太田川においてセジメントトラップに捕捉された沈降泥のPONとPOCの関係を示している。広島湾におけるセジメントトラップは5水深に設置された。図中の太実線は河川流量が50 m<sup>3</sup>/s以下の期間における放水路で捕捉された沈降泥の最大C/N比 (=14)、実線は易分解性の有機物が分解した後のC/N比 (=10)、破線はRedfield比のC/N比 (=6.625)を示している。

河岸に堆積している有機泥のC/N比は14前後の値である (図-4(b)) が、図-5から河岸に輸送、沈降される有機泥においてもC/N比は14前後の値をとっていることがわかる。C/N比の小さい比較的新鮮な沈降泥は市内派川よりも太田川放水路で多くなっており、湾奥での流れや河口からの海水の遡上形態の違いが輸送、集積される有機泥の平均的な性状を変化させていると考えられる。市内派川へは湾奥で再浮遊したC/N比の大きい分解の進んだ有機泥の輸送量が多いと推定できる。なお、上流河川水の分派量が少ないため、河川水の塩分は市内派川で高く、河川流出量の少ない市内派川河口部の閉鎖的な流域に浮遊可能な有機泥が多く蓄積されている。放水路では再浮遊した堆積泥の輸送の他に、広島湾内で生成さ

れた植物プランクトンの流入や一次生産力が市内派川よりも相対的に大きいことによりC/N比の小さい有機物が捕集されると考えられる。

4. 有機物の土粒子への付着形態

(1) 有機物の付着しやすい土粒子粒径

本節では採取された底泥を1~10 μm (小径粒子) と10~60 μm (中大径粒子) の粒子群に分けて、底泥に含まれる有機物量と各粒径粒子の含有割合との関係から有機物の付着しやすい土粒子粒径について検討する。図-6には広島湾海底泥のILと中央粒径 (D<sub>50</sub>) の関係、図-7にはILと小径粒子と中大径粒子の含有率との関係が示されている。

図-6から有機物が多く含まれる土粒子の粒径は大きい傾向にあること、図-7から小径粒子の構成比が大きい底泥ではILと負の相関、中大径粒子では正の相関があることがわかる。さらに、小径粒子ではC/N比が小さい有機泥ほどD<sub>50</sub>が大きい傾向にあり (図-6)、同一の有機物量ではC/N比の大きさによって、有機物の付着する粒径が異なる傾向にある (図-7) ことから、C/N比が小さい有機泥では中大径粒子に付着する有機物が多くなっていることがわかる。これらのことは有機物がシルト、粘土の微細土粒子に付着し、中大径粒子の有機泥を形成していること、分解が進むにつれ有機泥の粒径は小さくなり、中大径粒子の有機泥が粒径を小さくして小径粒子

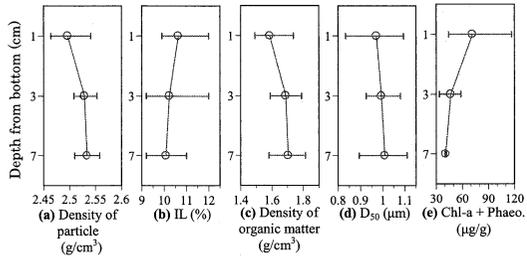


図-8 底泥の海底からの深さ別の(a)有機泥の比重, (b)IL, (c)有機物密度, (d)中央粒径, (e)Chl-a + Pheaco.量 (平均値を○, 最大値~最小値を|で示している)

に含まれる有機物が相対的に増えることを示している。

(2) 有機泥に付着する有機物の密度

図-1(a)に示す広島湾奥海域の2001年度の調査地点(8地点)で不攪乱採取した海底泥の分析結果を用いて有機泥に付着する有機物密度を求めた。有機物密度はIL値を有機物含有量,土粒子密度を2.68 g/cm<sup>3</sup>として,海底泥の比重,含水比,湿潤密度から求められた。図-8には海底表面からの深度別に有機泥粒子の比重,IL,有機物の密度,D50,Chl-a + Pheaco.含有量の最大値と最小値,平均値が示されている。土粒子の密度は2.68 g/cm<sup>3</sup>であるが,有機物の密度が1.5~1.8 g/cm<sup>3</sup>であるため,有機物が9~12%付着することで有機泥粒子密度は2.45~2.57 g/cm<sup>3</sup>にまで低下し,新鮮な有機物(Chl-a)を多く含む表層泥ほど有機泥粒子の密度が小さくなっていることがわかる。底泥内の有機物密度は深い層で大きくなり,湿潤密度が大きく,中央粒径が小さくなっていることから,有機物が分解されることによって有機泥の粒径は小さく密度が大きくなり,保水能力が低下していることがわかる。ただし,Chl-aは表層泥に多く含まれ,Chl-aを含む有機泥の密度は小さい傾向にあるが,広島湾全体での傾向をみると,Chl-aの含有量が少ない有機泥においても密度の小さい地点があり,Chl-a量が直接密度の指標とはなっていない(日比野・松本,2006)。

5. 有機泥の沈降と浮泥粒子の粒径分布の変化

(1) 細粒分の沈降に伴う実験

(有機物の付着が沈降速度に及ぼす影響)

海域の上,下層から放水路河口に輸送され沈降する有機泥をセジメントトラップによって捕捉した。表-1に示す二つの試料(河口部で採取された沈降物(S1)と広島湾海底の10cm深で採取された堆積泥(S2))の沈降に伴う粒度分布の経時変化を,レーザー回折式粒度分布計を用いて測定した。時々変化する浮遊有機物の粒度分布から有機泥の沈降特性について検討した。有機泥の沈降速度wは次式に示すストークス則によって表す。

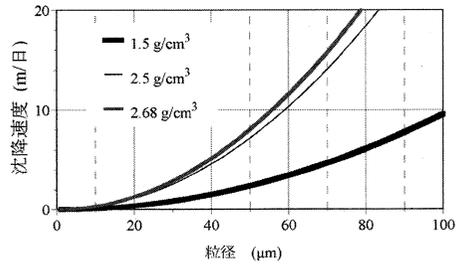


図-9 ストークス則より導かれる粒子密度別の粒径と沈降速度の関係

表-3 実験試料の採取場所と性状

試料名	採取試料	IL(%)	C/N ratio
S1	太田川河口部沈降泥	9.3	13.4
S2	広島湾堆積泥(10cm深)	15.4	10.7

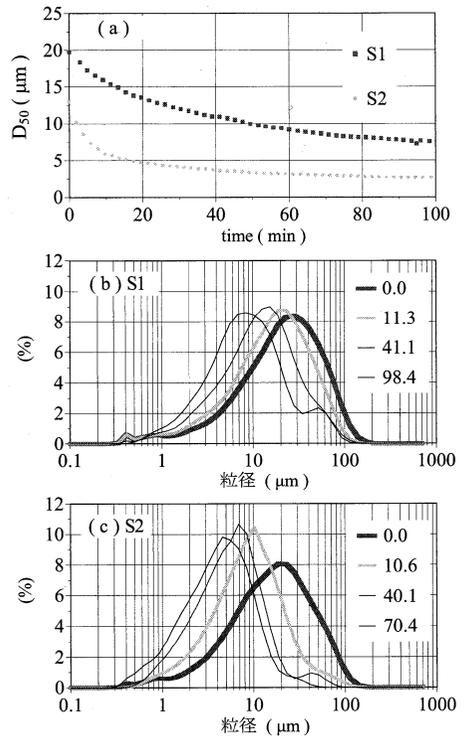


図-10 沈降による粒度変化の測定結果(a)S1, S2の中央粒径の変化, (b), (c)はS1, S2の粒度分布の時間変化(図中の凡例は測定開始からの経過時間(min))

$$w = \frac{4g(\rho_s - \rho)}{135\mu} d^2 \quad (1)$$

ここに,  $\rho_s$ :沈降粒子の密度,  $\rho$ :海水密度,  $d$ :沈降粒子の粒径,  $\mu$ :海水の粘性係数である。図-9にストークス則により導かれる粒子密度 $\rho_s$ に対する粒径と沈降速度の関係を示した。ここでは,実験条件と同様に蒸留

水中で水温10℃の条件下で算出している。図に示す $\rho_s = 1.5 \text{ g/cm}^3$ は有機物密度であり、 $\rho_s = 2.68 \text{ g/cm}^3$ は土粒子密度である。海底泥の密度は $2.45 \sim 2.55 \text{ g/m}^3$ の程度であることを考慮すれば、直径が30  $\mu\text{m}$ の粒径粒子の沈降速度は数 m/dayの程度であり、有機物は有機泥の3分の1程度、土粒子は有機泥の1.1倍程度の沈降速度である。

図-10には粒子の沈降による粒度変化の測定結果が示されている。図には(a)河口試料(S1)、海底試料(S2)の沈降に伴う中央粒径 $D_{50}$ の時間変化、図(b)、(c)にはS1とS2試料の沈降に伴う粒度分布の時間変化を示している。粒度分布は沈降せずに水中に残留する懸濁粒子の粒径別存在割合を示している。密度の小さい有機物が付着し、粒子密度が小さくなることによって沈降速度が遅くなる特性を利用して、ここでは有機泥の沈降と粒度分布との関係から有機物が付着する土粒子の粒径について考察する。

図-10(a)に示した浮遊粒子の $D_{50}$ の変化から粒径の大きい粒子の沈降速度が速い傾向にあること、図(b)と(c)に示した粒度分布の時間変化から、S1とS2では同粒径の有機泥の沈降速度が相対的に異なることがわかる。初期の $D_{50}$ はS1が13  $\mu\text{m}$ 、S2が20  $\mu\text{m}$ で粒度組成は概ね等しい試料であるが、S1とS2では有機物の付着形態(それぞれの粒径の土粒子に付着する有機物の量、分解度)が異なり、同粒径粒子の沈降速度に差が生じるために、浮遊粒子の粒度分布に大きな違いが現われている。沈降速度は試料に含まれる有機物の形状(分解度)と有機物が付着する土粒子の粒径に依存することから、有機物が付着した土粒子の密度が小さく(形状抵抗が大き)くなっていることが予想される。

河口試料(S1)では10~30  $\mu\text{m}$ 程度の粒径粒子の沈降速度が小さく、海底試料(S2)では5~10  $\mu\text{m}$ 程度の粒径粒子の沈降速度が小さい(図-10(b),(c))ことから、S1では10  $\mu\text{m}$ 以上、S2では10  $\mu\text{m}$ 以下の粒子に有機物の付着が多いことが推定できる。河口で沈降する有機泥は有機物が土粒子に付着し10~30  $\mu\text{m}$ の粒子を形成していること、海底に堆積する有機泥では分解が進んだ有機物が微細土粒子に付着して5~10  $\mu\text{m}$ の粒子を形成していることがわかる。

これらの結果は河口で沈降する有機泥と海底に堆積する有機泥では付着する有機物の量、あるいは分解度が異なることを示している。S2は20 m以上の沈降過程を経て10cmに堆積した有機泥を採取していることから海底泥には易分解性の有機物は含まれておらず、付着する有機物は海中にある有機物に比較して分解が進み比較的均一の分解状態にあると考えられる。これに対し、河口沈降泥には一次生産された比較的分解の進んでいない有機

物、分解度が様々に異なった有機泥、さらには低密度の無機物が混雑していると考えられる。図-7で示した結果と比較して考察すれば、有機物がシルト、粘土粒子の微細土粒子に付着し、10~60  $\mu\text{m}$ 粒径の有機泥粒子を形成していること、分解が進むにつれ有機泥の粒径は小さくなり、10  $\mu\text{m}$ 以上の粒径粒子の有機泥が粒径を小さくして10  $\mu\text{m}$ 以下の径粒子に含まれる有機物が徐々に増えていくことが推定できる。S2のC/Nは10.7であり、易分解性の有機物が分解された比較的新解な有機物が堆積していると判断できる。S1のC/Nは13.4であり、S2よりも大きな値を示しているが、図-4(c)に示したように河岸表層に堆積する有機泥のC/N比は14程度であり、河口で再浮泥した有機泥がセジメントラップに多く捕捉されたと考えられる。

## 6. まとめ

- 1) 河岸堆積泥の含水比とILに線形関係が見出された。海底泥は、河岸堆積泥における線形関係より大きな勾配の関係がある。また、C/N比の増加に伴う含水比の減少から、底泥の保水性は有機物量と分解度に依存する。
- 2) 広島湾堆積泥に含まれる有機物の密度は $1.5 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ 程度の値であり、有機物が9~12%付着することで有機泥粒子密度は $2.45 \sim 2.57 \text{ g/cm}^3$ まで低下している。この粒子密度の違いにより、有機物の沈降速度は有機泥および土粒子の3分の1程度である。
- 3) 河口で沈降する有機泥と海底に堆積している有機泥では、付着する有機物の量と分解度は異なる。分解が進んだ底泥の場合、10~60  $\mu\text{m}$ の粒径粒子中の有機泥は粒径が小さくなり1~10  $\mu\text{m}$ の粒径粒子となることで、有機物割合は大きな粒径粒子から小さな粒径粒子へと移行している。このため、10  $\mu\text{m}$ 以下の微細土粒子の沈降速度は遅い。河口で沈降する有機泥は分解度が様々に異なった有機物が含まれ、10~30  $\mu\text{m}$ の粒径粒子に相対的に多く含まれている。

## 参考文献

- 今川昌孝, 駒井克昭, 日比野忠史, 松永康司 (2008) : パケット型採泥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.
- 高御堂良治, 永尾謙太郎, 日比野忠史, 松本英雄 (2006) : 海面清掃船に設置された自動水質測定装置を用いた有機懸濁物質の沈降・堆積量の把握, 海岸工学論文集, 第53巻(2), pp.1156-1160.
- 日比野忠史・松本英雄 (2006) : 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, Vol.62, No.4, pp348-359.
- 日比野忠史, 西村尚哉, 駒井克昭, 松永康司 (2007) : 沿岸域における有機懸濁物質の沈降過程のモデル化, 海岸工学論文集, 第54巻(2), pp.1181-1185.