

# 汽水干潟域での有機物の輸送・堆積特性

## Deposition and Transportation Characteristics of Organic Matter in Brackish Water Region

阿部真己<sup>1</sup>・駒井克昭<sup>2</sup>・今川昌孝<sup>3</sup>・日比野忠史<sup>4</sup>

Masami ABE, Katsuaki KOMAI, Masataka IMAGAWA and Tadashi HIBINO

Observation and laboratory experiments were performed to understand the re-suspension mechanism of organic mud under salinity variation at an estuarine bed. The organic mud is transported upstream under the separation into different types of organic matter. The re-suspension flux of organic mud depends on not only the shear stresses and organic properties but also surface water salinity. The re-suspension flux of organic mud was separated into fresh water and saline water components. The re-suspension flux also depends on the content rate of POCs originated in oil and fat/primary production. The trend of turbidity in the Tenma River can be almost explained with the re-suspension formula of organic mud considering the salinity effect.

### 1. はじめに

太田川は広島デルタで6つの派川(太田川放水路, 天満川, 本川, 元安川, 京橋川, 猿猴川)に分派しているが, 河床高や形状が各派川毎に異なるために各河川に分派する淡水量にはオーダーの違いが生じている。広島湾の潮位差は4mあり, 広島デルタを越えて海水は15km以上上流まで遡上している。海水は海域に流出した有機泥を再びデルタ河川に輸送しており, 天満川では, 上げ潮初期に海水の遡上に伴った濁質の輸送が観測されている。今川ら(2009)は, 海水遡上によって運ばれる有機泥は沈降・堆積・巻き上げ(再浮遊)を繰り返しながら河道内を循環していることを示している。また阿部ら(2010)は, 有機泥の堆積や巻き上げは河川水の塩分の影響を敏感に受けるため河床材料は河川水の分派量の影響を受けることを示している。

デルタに流出する河川水は主に本川, 天満川および放水路を流下すると推定されているが, 有機泥の堆積状況は3河川で全く異なっている。3河川のうち, 天満川への有機泥の堆積量は極めて多く, 河床高は放水路, 本川に比較して1~2m高く, 本川から分派後の下流域では朔望低潮位時には河道全体が干出する。天満川は, 朔望低潮位時には流水部が断面の1割以下になる場が多く, 流水部には主に低塩分水が流れている。

本研究では, 堆積場の特性や堆積泥の性状の違いによる輸送機構を明らかにし, 有機泥の干潟への堆積状態を化学的な側面から説明することを目的とする。具体的には, 天満川の上流から下流までに堆積した有機物を採取

し, その性状を分析するとともに巻き上げる条件を室内実験により明らかにした。天満川に有機泥が堆積し易いメカニズムを明らかにすることで汽水域での干潟環境を改善するための有効な技術を開発することが可能になると考えられる。

### 2. 干潟堆積泥の性状と流況・水質調査の概要

図-1には(a)太田川の地形, (b)天満川の地形および調査地点が示しされている。図(b)中に示した破線の陸側は大潮最干時の干出域を示している。

#### (1) 有機泥性状調査

2009年12月7日に河口から上流まで8km程度の範囲と浄化水の放流渠付近の干出点で堆積泥が採取され, 採取泥の性状(含水比, 強熱減量(IL), 粒度組成, 懸濁態有機炭素(POC), 懸濁態有機窒素(PON), 硫化物量, n-ヘキサン抽出物質量)が測定された。また同地点にセジメントトラップ(φ10×70cmの円筒)が2009年12月7日から12月23日の間に設置され, 捕集量とその性状(強熱減量, POC, PON)が測定された。設置方法は, 上端開口部が河床面上30cmとなるように埋設された。採取された有機泥のPOCとPONはCHNS/O分析装置(パーキンエルマー社製2400 II型)により分析された。間隙水塩分濃度は有機泥を淡水中に混合し, 塩分計で塩分を測定した後, 濃度換算することで得られた。

#### (2) 有機泥の輸送形態の調査

水質は放流渠付近の地点3, 4, 5の非干出点に河床から10cm上に濁度計, 塩分水温計, 電磁流速計, 溶存酸素(DO)計(全てJFEアドバンテック社製compactシリーズ)が設置され10分間隔で連続測定が行われた。地点5, 7においては, 多項目水質計(JFEアドバンテック社製)を用いて水質(塩分, 水温, 濁度, Chl.a)の鉛直分布が1時間毎に測定された。

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

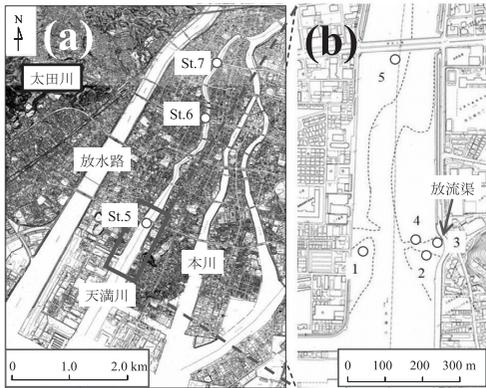


図-1 (a) 太田川の地形, (b) 天満川の地形と調査地点

### 3. 天満川に堆積する有機泥の分布特性

#### (1) 天満川に堆積する有機泥の性状

図-2には各地点で採取された堆積泥とセジメントトラップ捕集泥の有機性状が示されている。堆積泥の含水比とILはシルト・粘土分率に依存しており、上流ほどシルト・粘土分率が高く、河口からの距離に依存した分布特性を有している。天満川河口付近には江波水資源再利用センター(広島市水道局)の放流渠があり、下水道が合流式であるため出水時には未処理水が放流されることがある。放流渠付近は局所的にシルト・粘土分率が高く、それに対応して強熱減量も大きい。硫化物は放流渠付近の堆積泥に多く含まれ、堆積泥は黒色化し、硫化水素臭も確認されていることから、放流渠付近に向けて堆積泥の還元状態が強くなっていることが理解される。n-ヘキサン抽出物質については、放流渠付近と上流(地点7)で多く堆積しており、必ずしも河口からの距離に依存していない。堆積泥とセジメントトラップ捕集物の強熱減量とPOC、PONが相似の関係性を有しているが、捕集量は放流渠付近で局所的に多くなっている。

#### (2) 濁質の輸送形態の把握

図-3には2009年12月7日に(a) St.7と(b) St.5で上げ潮初期に測定された水質の鉛直分布および河床での流速が示されている。約3km離れた両地点で8時頃に高濁度水塊が遡上する現象が観測されている。この現象は上げ潮期間中継続せず、両地点とも塩分の上昇の前後で高濁度の状態は解消されている。St.5では、上げ潮初期には流速の上昇と対応して濁度が上昇しているが、その後は20cm/sを越える流速に曝されても河川水中の濁度は上昇しておらず、濁度上昇は必ずしも流速のみで決定していない。濁質を輸送する水塊の塩分濃度は河口からの距離によって異なり、上流に位置するSt.7ではSt.5より低い塩分濃度でも濁質が輸送されている。濁質の遡上量は下流側(St.5)で多く(濁質の浮遊高さと時間が長い)、濁度

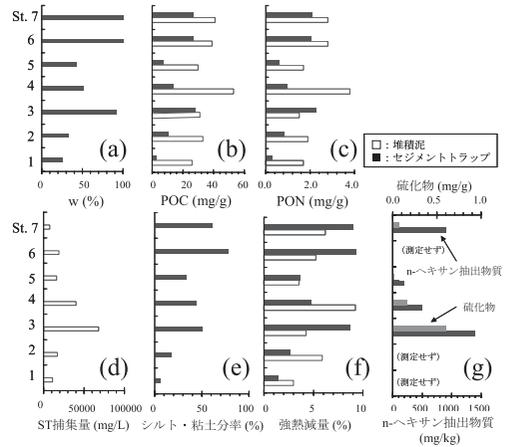


図-2 各地点(St.)の堆積泥とセジメントトラップ捕集泥の有機性状

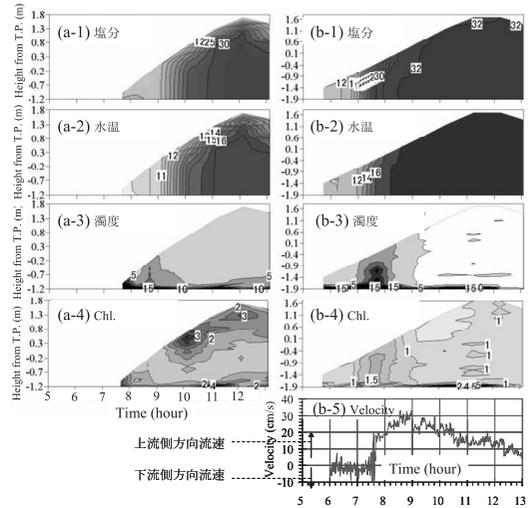


図-3 2009年12月7日に(a) St.7と(b) St.5で上げ潮初期に測定された水質の鉛直分布と河床流速

のピークはSt.5とSt.7で1時間程度の位相差があり、下流から上流に濁質が輸送されていることが予想される。また下流側のSt.5での濁度とクロロフィルのピークが一致しているが、上流側のSt.7では、濁度とクロロフィルの相関が小さいことから、上流に輸送される間に濁質の選別(ふるい分け)が行われていることが予想できる。

例えばn-ヘキサン抽出物質の含有濃度が上流のSt.7で高いのは有機泥の遡上過程として、下流からの輸送間に沈降・巻き上げを繰り返すうちに沈降し易い有機泥は沈降・堆積し、沈降し難い油脂類を含有する有機泥が選択的に上流に運ばれ、堆積していると考えられる。すなわち、有機泥は付着する有機物の特性のみならず、河川水質や堆積時の水質環境に応じて分別されつつ上流に輸送されていることが推定される。

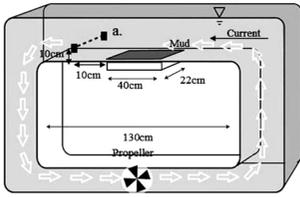


図-4 実験装置

表-1 実験ケースと有機泥の性状

Case	Sediment	Salinity (psu)	St. 3	St. 4	St. 5	St. 7										
3-0	St. 3	0.0	Water content	91.2	51	42.2	104.6									
3-2		1.5		Ignition loss (%)	8.76	4.79	3.67	8.99								
3-13		12.7			Silt and fines rate (%)	50.62	44.44	32.8	61.17							
3-30		30.0				Salinity of pore water (psu)	21.5	23.9	20.4	5.5						
4-0	0.0	Void ratio (%)	26.0	16.3	13.7		28.8									
4-1	1.0		POC(mg/g)	22	14		6.2	25								
4-7	7.0			PON(mg/g)	1.3		1.1	0.5	2.2							
4-16	15.6				POP(mg/g)	0.5	0.3	0.3	0.8							
4-32	32.0	C/N(mol/mol)				14.5	16.6	14.8	15.1							
5-0	0.0		Sulfide(mg/g)	0.61	0.16	0.02	0.08									
5-1	1.3			n-hexane extract (mg/kg)	1400	500	200	900								
5-6	5.5				ORP(mV)	-324	-246	-109	14.1							
5-10	10.0	St. 7				1.0	0	5	22							
5-20	20.0		1			6				11	5	22				
5-30	33.0			16									10	30	20	16
7-0	0.0				20											
7-1	1.0	30					20	30	20							
7-5	5.0		30			20				30	20	16				
7-10	10.0			30									20	30	20	16
7-30	30.0				30											

表-2 実験定数

	St. 3	St. 4	St. 5	St. 7
$\Delta A1$	-	5	2	7000
$A_{01}$	-	3.0	1.5	0.5
$\sigma$	-	9.0	0.2	0.1
$S_L$	-	0	0	0
$\Delta A2$	200	23	3	14.5
$A_{02}$	20.0	1.0	0.4	0.3
$\sigma$	180	80	200	20
$S2$	35	22	30	16

表-3 有機性状

	St. 3	St. 4	St. 5	St. 7
$POC_p$	13	11	5	22
$POC_o$	9	3	1.2	3
$POC_o/POC_p$	0.69	0.27	0.24	0.14

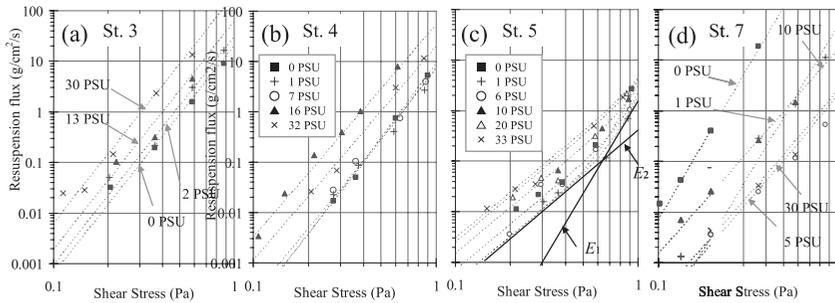


図-5 各地点 (St.) の巻き上げフラックスと底面せん断応力の関係

#### 4. 有機物輸送に及ぼす流水塩分の効果の把握

現地では採取された有機泥の異なる塩分の流水下における巻き上げ実験により有機物の輸送 (巻き上げ) に及ぼす河川水 (流水) の塩分状態の効果把握した。図-4には実験装置が示されている。水槽中央部には有機泥の試料 (幅23cm × 流れ方向長さ40cm × 厚さ5cm) が設置され、流れに対して生じる有機泥の巻き上げ量が測定された。有機泥は実験ケース毎の均質性を確保する目的で、よく攪拌した後に巻き上げ層を敷設した。巻き上げ量 (SS) は図中のa点 (泥表面からの高さ10cm) にレーザーを通し、あらかじめSSでキャリブレーションされたレーザーの減衰量から換算している。巻き上げ層の有機性状や流水の塩分濃度が巻き上げに及ぼす効果は巻き上がった泥の鉛直Fluxおよび限界せん断応力から評価した。底面せん断応力は電磁流速計で測定した流速の鉛直分布から求められた摩擦速度を用いて算出された。実験ケースと有機泥の性状を表-1に示す。実験はSt.3, 4, 5, 7の4地点の有機泥を用いて回流させる流水の塩分濃度 (以下、流水塩分) を変化させ、20ケース実験を行った。

##### (1) 堆積・流水環境と巻き上げ形態

図-5には採取地点毎に整理した実験結果が示されている。底面せん断応力 ( $\tau$ ) と巻き上げフラックス ( $E$ ) の

関係は両対数紙面上で概ね直線近似できるが、流水塩分にも依存しており、巻き上げフラックスが底面せん断応力と堆積状態 (含水比, 間隙量, 有機泥の性状) のみで決定していないことを示している。下流側のSt.3, 4の試料を用いた実験 (Case3や4) では淡水中よりも塩水中での巻き上げフラックスが多く、逆に上流側の間隙水塩分の低いSt.7の試料を用いた実験 (Case7) では淡水中での巻き上げフラックスが多い傾向にあり、正反対の巻き上げ特性を有している。特にSt.7 (Case7) では、流水塩分に対して巻き上げフラックスの変動が大きい。

##### (2) 巻き上げ形態の分類

図-5において、せん断力に対する巻き上げフラックス (巻き上げ率, Elusion rate) に着目すると、流水塩分が低い場合に巻き上げ率が大きく、流水塩分が高くなるにつれて巻き上げ率が一定となっている様子がわかる。実際、巻き上げ率が異なれば、有機泥のはがれ方が大きく異なり、低塩分水流れによる巻き上げと高塩分水流れによる巻き上げは異なる現象が起こっていることが考えられる。ちなみにSt.7の場合では、低塩分水中での巻き上げは表面全体から粒子ごとにはがれるのに対し、高塩分水中ではある程度大きな塊のままはがれていく。ここでは、各地点の有機泥の巻き上げフラックスを (1) 式の形で整理し、新たに独立な2つの巻き上げフラックス  $E_1$  およ

び $E_2$ を定義した。ここに、底面せん断応力は淡水でも塩水でも同じと仮定した。

$$E = E_1 + E_2 = A_1 \tau^{B_1} + A_2 \tau^{B_2} \dots\dots\dots (1)$$

図-5中の破線は(1)式による近似線である。ここに、 $B$ は巻き上げ率であり、 $E_2$ に対する巻き上げ率( $B_2$ )は全ての地点の巻き上げ実験結果においてほぼ同様の値を有しており平均値(4.2)を与えた。 $E_1$ に対する巻き上げ率( $B_1$ )はばらつきがあるが一定値としてよいものと仮定して、 $B_2$ 同様に平均値(5.5)を与えた。(1)式により分離された巻き上げ率( $A_1, A_2$ )が図-6中に示されている。例えば、St.5での流水塩分が1 PSUの場合の巻き上げ実験結果は、図-6中に実線で示されている $E_1$ および $E_2$ の足し合わせで表現されている。

図-6より、 $A_1$ はいずれも流水塩分が0 PSUで極大になっているが、 $A_2$ は地点ごとに固有の流水塩分(以下 $S_2$ )で極大値となっていることがわかる。 $A_1$ および $A_2$ は(2)式により近似され、図-6中に曲線で示している。

$$A_i = A_{0i} + \Delta A_i \times \exp\left(-\frac{(S - S_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (i = 1, 2) \dots\dots (2)$$

ここで、 $S$ は流水塩分、 $A_i$  ( $i=1, 2$ )が最大となる時の流水塩分を $S_i$ 、 $A_1, A_2$ の最小値を $A_{01}, A_{02}$ とし、 $A_i$ の変動幅を $\Delta A_i$ とした。 $\sigma$ は $A_i$ の極大値の山の尖度具合(広がり具合)を表す定数であり、ここでは実験値に合うように最適値を求めている。表-2に(2)式に用いた定数がまとめられている。

(3) 有機物の分類手法

有機性状の違いを表現するために、(3)式に示すような指標を新たに定義し、結果を表-3にまとめた。(3)式は有機泥の性状は有機物を一次生産起源と思われる有機物と、 $n$ -ヘキサン抽出物質を含む有機物(炭素のみに関係すると仮定)の2種類に分類し、その構成比で表現したものである。

$$\frac{POC_o}{POC_p} = \frac{POC - kPON}{kPON} \dots\dots\dots (3)$$

$$C/Nratio = \frac{POC_p}{PON} = k \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $POC_p$ は一次生産起源の懸濁態有機炭素量であり、難分解物質の場合は $C/N$ 比が概ね10程度(mol比)になること(日比野ら, 2008)から推定された。また、一次生産起源の $C/N$ 比から説明付けられない過剰の $POC$ 分を $POC_o$ として定義した。実際 $POC_o$ は、堆積泥中の $n$ -ヘキサン抽出物質とよく対応しており、 $POC_o$ が大きいほど、油脂分の存在量が多いものと理解できる(表-1, 表-3)。

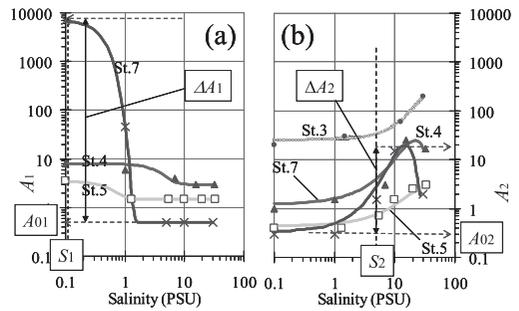


図-6  $A_1, A_2$ と流水塩分との関係

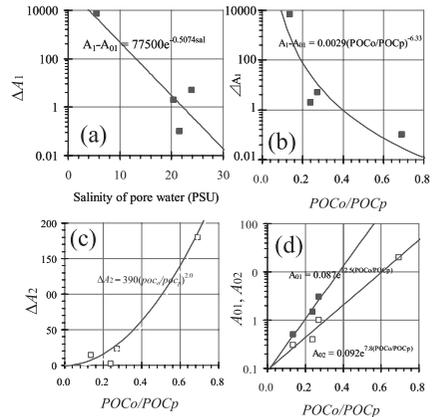


図-7  $\Delta A_1, \Delta A_2$  および  $A_{01}, A_{02}$  と有機泥の性状の関係 (a) 間隙水塩分と  $\Delta A_1$ , (b) 有機物の構成比と  $\Delta A_1$ , (c) 有機物の構成比と  $\Delta A_2$ , (d) 有機物の構成比と  $A_{01}, A_{02}$

(4) 塩水・淡水中での有機泥の特性

図-7に $\Delta A_1, \Delta A_2$ と有機泥の性状との関係が示されている。 $\Delta A_1$ は間隙水塩分が小さいほど大きくなることわかる(図-7(a))。また、 $\Delta A_1$ は $POC_o/POC_p$ の減少ともなっても増加している(図-7(b))。 $\Delta A_2$ は $POC_o/POC_p$ の増加とともに増加している(図-7(c))。また、 $A_{01}, A_{02}$ については、いずれも $POC_o/POC_p$ の増加とともに増加する傾向にある(図-7(d))。St.3からSt.5は、間隙水塩分が同程度であるにもかかわらず、 $A_1$ と間隙水塩分の関係(図-7(a))にばらつきを有しているが、これは間隙量の違いなどにより、流水塩分の作用の違いが出た結果と考えられる。

土粒子同士の相互作用(凝集や分散)は、淡水中では斥力が大きくなり分散し巻き上げやすくなるが、塩水中では引力が大きくなり凝集作用により巻き上げ難くなることが考えられる。しかし、土粒子間に有機物が存在することでその挙動は複雑となり、有機物の特性によっては全く異なる挙動を示すことがある。

St.4, 5, 6の有機泥について淡水中での巻き上げフラックスの増加が確認される。その一方で、St.3の有機泥は、淡水中での巻き上げフラックスの増加がなく、流水塩分の増加とともに巻き上げフラックスが増加してい

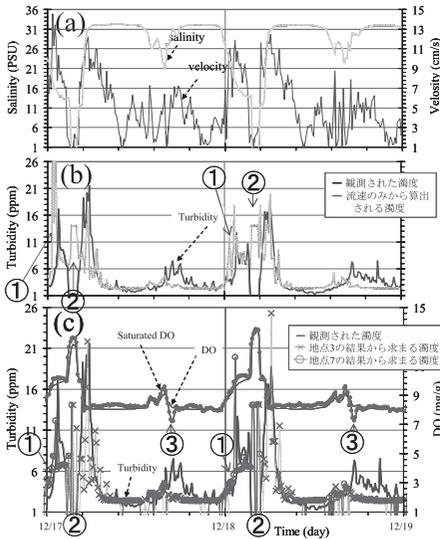


図-8 水質の経時変動

る。これは  $POC_o$  含有率が高い ( $POC_o/POC_p$  が大きい) ことに起因していることが考えられる。  $POC_o$  含有率が高いことで低塩分流水に対して巻き上げづらくなる (または高塩分流水に対して巻き上げやすくなる) 土粒子のみの場合には考え難い挙動とよく対応しており、  $POC_o/POC_p$  はその有機物の巻き上げ特性を表現する指標として有用であると考えられる。人間活動などに起因する n-ヘキサン抽出物質などの油脂分の汽水域への大量の流入により、それを含有した有機物の物理挙動 (巻き上げやすさ) が変化することで有機物の循環機構が変化する可能性が示唆された。

(4) 異なる有機物の輸送における流水塩分の効果

図-8はSt.5での (a) 塩分, 流速, (b) 濁度, (c) 濁度, DOの経時変動である。飽和DOは水温・塩分から算出された。また、河川水 (流水) 塩分と流速による効果を考慮し予測された濁度も同時に示し、図-8 (b) には有機性状や流水塩分の効果を考慮しないもの、図-8 (c) には有機性状と流水塩分の効果を考慮するものをそれぞれ (5) 式より予測された濁度も同時に示した。

$$Turbidity = Turb_0 + \alpha E \dots\dots\dots (5)$$

ただし、Eは巻き上げによる濁度上昇量であり、(1) および (2) 式より与えた。Eには、図-8 (b) ではA、Bに一定値を与えたが、図-8 (c) では上げ潮時にはSt.3の条件を用い、下げ潮時にはSt.7の条件を用いた。一度濁った濁水は、その濁度が小さくなるまで時間がかり、特に水塊の塩分が小さいときには1週間以上経過した場合でもある程度の大きな濁度状態を保持する。その濁度を  $Turb_0$  として、水塊の塩分と1週間後の濁度の関係 (実験結果) から与えた。

濁度上昇は河床流速と対応しており巻き上げに伴う濁度上昇があると考えられるが、図-8 (b) と (c) を比べると、流水塩分の効果を用いることで濁度上昇をよく表現できるようになることがわかる。特に図中①の時点での濁度上昇がよく再現されており、流水塩分による巻き上げ促進・抑制が大きな役割を果たしている。図中②の時点での小さい濁度が再現されていないが  $Turb_0$  がもともと一度濁度上昇のある状態を仮定しているため、流速が小さく濁度上昇がもともと起こらないと考えられる水塊の濁度の再現はできていない。潮位差が小さい時に比較的小さな流速下における濁度上昇が再現されていない (図中③の時点) が、この時には決まってDO値が飽和DOよりも低いことから海域からのより含水比の大きい有機泥が輸送されたことが原因と考えられる。有機物の空間的な運動や詳細な有機泥の分布を考慮していないため、完全には濁度の変化を表せていないが、この結果は現地でも実験室と同様の現象が起きていることを示すものである。

4. おわりに

感潮域で起こる有機泥の堆積は、沈降・堆積が起こる場での塩分環境、有機汚濁物質の放出口からの距離によって複雑に変化するが、これは有機泥の物理挙動が流水塩分の作用をうけ、有機物の構成によってその作用の形態が異なることに起因していることがわかった。有機物 (POC) を一次生産起源のものと油脂分由来と考えられるものの2種類に分類しその構成比を考慮することで流水塩分の変動にともなう複雑な巻き上げ形態を表現することが可能となった。この有機物の性状の違いによる複雑な物理挙動は有機泥の堆積特性や河川水の濁度上昇およびDO消費特性に関連している。特に有機物の遡上過程として、河川水質や堆積時の水質環境に応じて分別されつつ上流に輸送されており、その分別作用に流水塩分が大きな役割を担っていることが予想された。また、人間活動などに起因する n-ヘキサン抽出物質など油脂分の感潮域への大量の流入は、有機物循環機構に大きく影響する可能性が示唆された。

参考文献

阿部真己, 今川昌孝, 駒井克昭, 日比野忠史 (2010) : 河川感潮域での有機物輸送における塩分の働き, 水工学論文集, 第54巻, pp. 1645-1650  
 今川昌孝, 駒井克昭, 日比野忠史, 阿部 徹, 西田芳浩 (2009) : デルタ河川河口域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  
 日比野忠史, 今川昌孝, 阿部 徹, 福岡捷二 (2009) : 太田川デルタを流れる感潮派川での流れ特性, 水工学論文集, 第53巻, pp. 1393-1398  
 日比野忠史, 永尾謙太郎, 松永康司 (2008) : 有機泥の分解を考慮した沈降と堆積過程のモデル化, 土木学会論文集, 第64巻, pp. 202-213