

河口域に堆積する有機物を含む細粒泥の 特性把握に関する考察

日比野 忠史¹・森本 優希²・福岡 捷二³・植田 章⁴

¹正会員 広島大学大学院准教授 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:hibinot@hiroshima-u.ac.jp

²非会員 ラボテック株式会社 分析部 (〒160-0004 広島市佐伯区五日市中央6丁目9番25号)

E-mail:y-morimoto@labotec.co.jp

³フェロー会員 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

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

感潮河川では海水の遡上とともに河口から運ばれる有機泥が高塩分下で河岸干潟に堆積している。高塩分下で堆積する有機泥は有機泥、間隙水、流水中に存在するイオンの相互作用により輸送過程における物理運動に強い影響を与えている。本論文ではヘドロ化が進んだ河岸干潟において地盤を形成する有機泥の特性量を評価するためのテクスチャーとなる物理・化学量の個々の特性および相互の関係を考察した。さらに、感潮河川で輸送・堆積する有機泥の基本となる指標とその評価法についてまとめた。提案されたテクスチャーから実河川における有機泥の輸送・堆積状態について推定し、テクスチャーの妥当性を確認した。

Key Words : texture, reduction, composition, sedimentation, transportation

1. はじめに

海水が遡上する感潮河川では堆積泥に接する陽イオンの種類やpH等が変化する機会が多くなり、微細粒子間の相互作用は複雑になっている。海水と陸水では密度等の物理量が異なるのみならず、溶存する陽イオンの種類と濃度が微細粒子の物理挙動に変化を与えることがわかっている¹⁾。広島市内派川河岸に堆積した過剰の有機物は還元化（ヘドロ化）して、生態系の劣化をまねいている。健全な河川を再生するには有機物の性状を理解して対策する必要があるが、一般に河岸堆積泥の分析には淡水地盤を基準とした測定法が準用され適確な分析ができない場合がある。有機物を付着する土粒子は種々のイオンが異なる濃度で存在する海水と接触すると、その化学特性を大きく変化させるため、通常の調査で行われる水質や土質分析では堆積状態の判断が難しくなる。

海水の浸入や有機物の放流機会が多い河口域では、例

えばNa⁺や付着有機物は泥粒子の液性限界を増大させる²⁾ために地下水の流動性低下や地盤の軟泥化を引き起こす。流動性の低下や軟泥化は、有機物の嫌気分解と合いまって地盤の還元化を強め、生物棲息場を劣下させていく。

本研究では有機泥の還元化が進んだ河岸干潟において母岩が風化して生産される2次鉱物（粘土粒子）への水分や有機物の吸着、および陽イオン交換特性を考慮した有機泥の特性量を評価するための物理・化学量を検討する。本論文はそれらの相互の関係を見い出して有機泥の性状を評価するための基本となる指標を提案することを目的としている。

2. 有機泥の組成と有機物含有量

(1) 有機物の嫌気性分解過程と燃焼元素

易分解性である分子構造が不安定有機物（多糖類、タンパク質、脂質等は不安定な有機物に分類される）の嫌気性分解（消化）では、低分子化（加水分解、酸生成

等) 過程～二酸化炭素やメタンが生成される無機化過程がある。無機化まで至れば有機物は減量方向に進むが、低分子化過程では有機酸や腐植性有機物の生成が活発化するため有機物の総量は増加する場合が多い。600℃での燃焼減量 (IL₆₀₀) による分解量の推定では有機物の低分子化過程での質量の増加を考慮する手法が確立できておらず、IL₆₀₀の増加は異常値として扱われることが多い。有機物の消化において加水分解でのH⁺, OH⁻の付加、腐敗時のSの付加等があると低分子化過程でのIL₆₀₀の増加が起こる。有機物の低分子化過程ではH, N, S, O量が増加するため、堆積状態にある有機物の特性をIL₆₀₀のみにより把握することはできない。IL₆₀₀として測定されるのは燃焼する元素の和であり、燃焼する元素はC, H, N, S, Oである。したがって、IL₆₀₀には有機物を組成するPやAl, Fe等は含まれないが、水酸基等を持つ化合物やCaCO₃等の無機物中にもC, H, Oが含まれている。有機物の減量は分解過程において気化や液化によって起こることから、堆積状態にある有機物量の変化を評価するための測定値としてIL₆₀₀は正確ではない。一方、不安定有機物を材料として、フミン酸、フルボ酸、ヒューミン等の腐植性有機物の生成が行なわれる²⁾。腐植性有機物の生成は不安定有機物の減量になるが、有機物全体の減量として現れないこともIL₆₀₀で有機物の分解量を表わせない理由である。

(2) 有機物の分類と組成変化

一般的に有機物が過剰に堆積した河岸の浄化は有機物の分解を促進させ有機物量を減少させることと認識されることが多いが、生物の棲みやすい地盤環境が創られることが本来の浄化であると考えられる。多量に堆積した不安定有機物の無機化過程が土壌の還元化を進め、生態系の悪化を起しているにも関わらず、干潟等沿岸環境の評価はN, P等の富栄養物質やORP, 硫化物量に視点がおかれることが多く、富栄養場を形成する有機物の状態を評価することは稀である。沿岸環境の悪化の成因である富栄養化や還元化は有機物量のみならず有機物の形態に依存する。

有機物に関連した分析項目としてはIL₆₀₀, 含水比, 粒度組成が主に測定されてきた。富栄養化した土壌では有機物量として評価されるIL₆₀₀が減少することで環境改善されると信じられることが多く、IL₆₀₀の減少量を改善の指標とすることが多い。沿岸域に堆積する有機物は極めて複雑な構造を持つことから有機物の種類やその分解過程を特定することはできない。有機物を簡易に区分する方法として有機物の燃焼温度と組成を検討する方法³⁾がある。生物の棲息を阻害する堆積有機物層の還元化(ORP), 酸性化(pH)は脂質, タンパク質等の不安

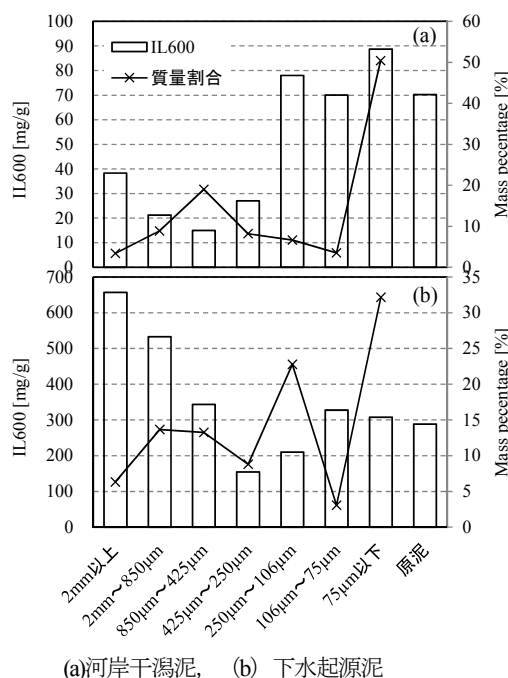


図-1 有機泥の粒度分布と各粒度での有機物量の関係

定有機物の加水分解に引き続くアミノ酸等の分解であり、有機物の組成変化を表わしている。組成変化はIL₆₀₀に加えて組成する元素量を分析することで推定が容易になる。

(3) 有機泥の粒度分布と有機物含有率

広島湾沖に堆積する海底泥は主にプランクトンを起源とする粒径の90%以上が75μm以下の粒子で構成され20~30μm程度をピークに分布している⁴⁾。図-1に水槽内でフルイ分けした採取試料の粒度分布と各粒度での強熱減量(IL₆₀₀)の関係を示した。(a)には海成と陸成(下水を含む)の有機泥が堆積する河岸干潟泥(天満川上流), 図(b)には主に下水成分で構成される海底泥(福山泥)が示されている。干潟堆積泥と下水起源泥では粒径に対する有機物の付着分布が異なることがわかる。沿岸に流出した多くの有機物は細粒化(細胞壁の破壊等)を経て2次鉱物と結合し、多くは75μm以下の細粒子として存在している。有機泥を形成する2次鉱物の粒径は数10μm以下であり、2次鉱物には同程度の粒径以下の有機物が結合し易いため、20~40μmにピークを持つ有機泥が形成される。これに対し、下水を起源とする有機泥では細胞が完全に破壊されていない大粒径の有機物が存在し、425μm以上の粒径粒子にも有機物が含まれている。放流下水には細胞壁等が破壊されない粒径の大きい有機物が単独で存在するためである。

3. 感潮河川内での有機泥の挙動

有機泥は、含有する有機物の分解の程度や泥層内にある間隙水のイオン（特にアルカリ土類金属や電子伝達体）状態に依存してその挙動が変わることから、本章では粒径、組成によって変化する有機泥の物理挙動について述べる。

(1) 有機泥の構造と輸送・沈降

a) 有機物の付着と水分保持能力

有機泥は微細な2次鉱物に有機物が結合して水分を保持し易いフロック構造を有しているため、通常、含水比は有機物含有量や微細粒子含有量と一意的な関係がある。広島市内派川に堆積する有機泥では有機物量の10倍の水分保持能力を持って堆積している⁴⁾。有機物は負に帯電する2次鉱物表面に電気的に結合しており、複数の土粒子、有機物が相互に結合し、有機物と2次鉱物がフロック（フラクタル構造体）を形成している⁹⁾。フロックが形成されると粒子単体で存在するよりも自由水を保持し易くなり、高い保水能力を持つと考えられる。

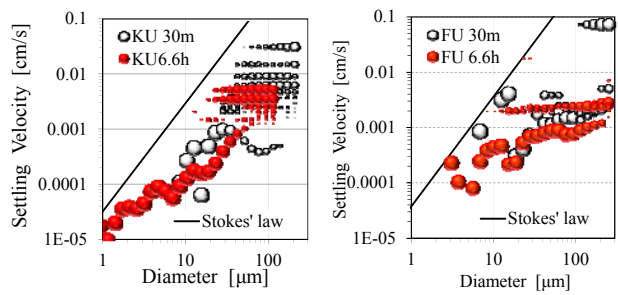
b) 吸着水の構造と含水比（粘着性）

粒子に吸着する水分子には、2次鉱物内や表面に電気的に強く吸着する構造水（強吸着水）、電気二重層に吸着する水和イオン（弱吸着水）がある。さらにフロック内には自由水が保持されている。強吸着水は500℃以上で蒸発し、自由水は100℃程度で蒸発する。自由水には重力によって落下する重力水と重力に抗する毛管水が含まれる。110℃の炉乾燥で測定される含水比は弱吸着水と自由水の和である。

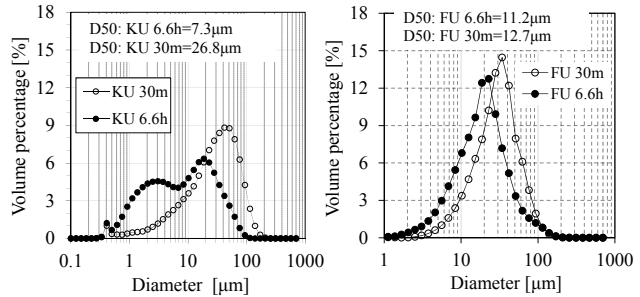
c) 有機泥の沈降速度

懸濁態物質が海水中に流出すると沈降速度が速くなることはよく知られている。沈降速度は粒径と粒子密度に依存するが、陸水から海水に変わる区域での有機泥粒子等から成る懸濁態物質の沈降では粒径への依存度が高くなる⁹⁾。粒子が海水中に流出するとpHが高くなることから、2次鉱物にイオン結合していたH⁺が離れ易くなり、負に帯電した粒子表面に他の2次鉱物、有機物、または金属イオンが結合して粒径が増大し沈降速度が速くなると考えられている。

図-2に海成泥と下水起源泥の沈降速度が比較されている。図では30分以内に沈降した有機泥（30m）と6.6時間以上沈降しない有機泥（6.6h）に分けて沈降選別された(a)呉泥（KU）、(b)福山泥（FU）の沈降速度と粒度分布が比較されている。レーザー回折式粒度分布計（島津製作所社製：SALD-2000J）を用いて試料の粒度分布を連続的に測定し、沈降により時々変化する有機懸濁物質の粒度分布から沈降速度が求められた⁹⁾。図(a-1)、(b-1)での各円の大きさは粒径～沈降速度の頻度分布を表してい



(a-1) 呉底泥の沈降速度分布 (b-1) 福山底泥の沈降速度分布



(a-2) 呉底泥(KU)の粒度分布 (b-2) 福山底泥(FU)の粒度分布

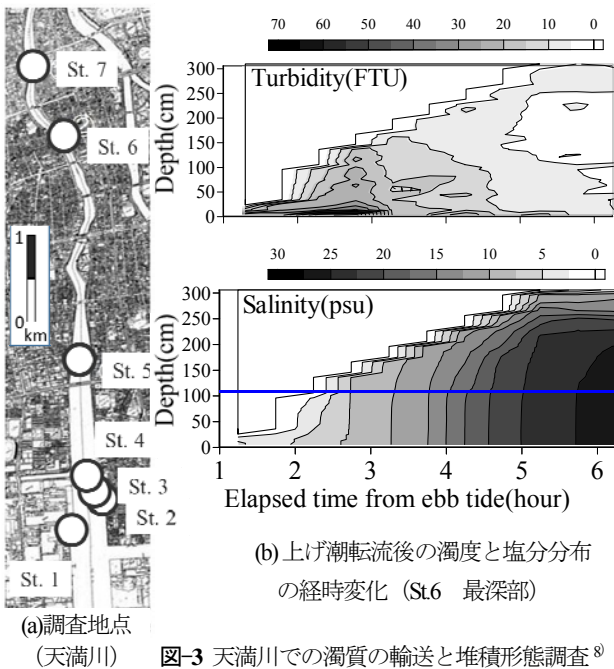
図-2 沈降選別された有機泥の有機性状

る。沈降選別された有機泥の IL_{600} は KU30m=7.5%、KU6.6h=13%、FU30m=16.5%、FU6.6h=17%である。KUでは沈降速度の遅い有機泥（6.6h）に有機物が多く含有されているが、FUでは有機物量に顕著な差は現れていない。さらに、粒径が大きく有機物量が多いFU（下水起源）の沈降速度はKU（プランクトン起源）に比較して速い特性が測定されている。これは下水系汚泥の輸送距離が短い特性⁷⁾として現れる。なお、FU粒子は弱くフロック化する特性があり、沈降しない粒子であっても沈降試験中に他の有機泥と接触することによりフロック化し沈降速度が速くなることもある。選別される6.6hの有機泥において沈降速度が速い粒子は試験中にフロック化した粒子である。

(2) テクスチャーとなる有機泥の特性

a) 海水が遡上する河道内での有機泥の挙動

調査対象とした地点は水深15~20m程度の太田川市内派川河口域と図-3に示す天満川のSt.1~St.7である。河口から上流に向かって輸送され異なる地形に堆積した有機泥、およびセジメントトラップに捕捉された浮遊泥について分析を行なった。天満川河床の標高は天満川が分派した本川より2m程度高くなっており、有機泥の堆積量が多く干潟面積が広がっている。天満川河口には下水放流渠があり、計画を越える雨天時には下水が放流され放流渠周辺には下水が土粒子とフロックを形成し還元状態で堆積している。河道内で輸送されている有機物の多くは細粒化が進み有機物が微細土粒子に付着して75μm以下の有機泥を形成している。本調査では放流渠を中心



として上下流に輸送、堆積される有機泥を採取し、その性状を測定した。

陸水が流下する流水部と陸水と接する機会が少ない河岸干潟では有機泥の輸送と堆積形態が全く異なっている。図-3(b)は阿部ら⁸⁾が St.6 最深断面において上潮時に塩分と濁度のプロファイルを測定したものである。河口に堆積した有機泥は上げ潮に伴い海水まじりの陸水と共に遡上するが、上げ潮当初の流水部では海水よりも陸水が多く遡上するため、10psu 程度以下の低塩分の河川水になっている。低塩分の河川水は流水部に堆積した有機泥を巻き上げつつ上流に輸送するが、海水と混合して塩分が上昇すると、底泥は沈降する現象が観測されている。これに対し河岸干潟では陸水が乗り上がることはなく、高塩分の海水が堆積泥上を遡上していく。阿部ら⁸⁾は塩水中で堆積させた有機泥上を塩水と淡水を流して行なった掃流実験結果と DLVO 理論 (有機泥粒子まわりの単位面積当たりのポテンシャルエネルギーは静電反発力によるエネルギーと分子間力によるエネルギーの和で表わされる)⁹⁾から、含有有機物量が少なく、間隙水、河川水の塩水の塩分濃度が大きくなるにつれ、有機泥を巻き上げるに必要なせん断応力が大きくなることを示している。阿部らの結果は、海水の中で堆積した有機泥は海水によって掃流され難いことが河岸干潟の泥化を進行させることを示している。

b) 油脂類の輸送

有機物の種類を特定することは困難であるが、油脂類の指標として n-ヘキサン抽出物質がある。油脂類は St.3 で最も高濃度 (約 3mg/g) に堆積しているが、St.6 においても 1mg/g 程度を維持した有機泥が輸送され、油脂類が堆積している⁸⁾。脂肪酸は飽和、不飽和や炭素量等の

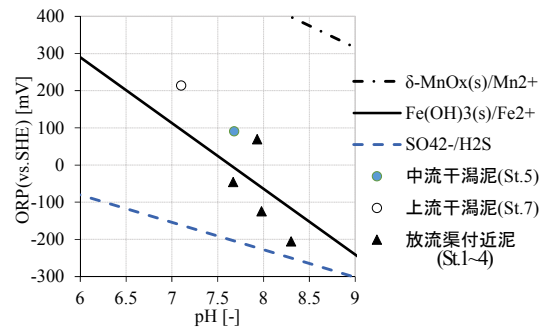


図-4 濁質の輸送と pH-ORP 関係

組成によって性状変化が大きく、pH、ORP によっても性質を変化させる。飽和高級脂肪酸の分解速度は他の不安定有機物に比べて遅く、淡水で輸送されやすい特性を持っている。さらに脂肪酸は炭素数が減少するにつれ、固体、液体、気体と変化する特性を有している。油脂類の多くを占める脂肪酸は分解に伴って炭素組成率や物性が変化するので有機泥の挙動と性状の変化を関連付ける指標として活用できる。なお、下水起源泥における油脂類含有率 10mg/g オーダであるが、一般的な内湾堆積泥では 0.1mg/g のオーダである⁷⁾。

c) 有機物の性状指標となる C/IL 比 (炭素組成率)

有機物の炭素組成はその種類によって異なっているため有機物の起源、堆積履歴等に依存して有機泥の C/IL 比が異なる。脂肪酸では分解 (低分子化) により C/IL 比には 2 倍程度の差が生じる。C/IL 比は有機物の起源や堆積状態により 0.2~0.8 程度の範囲にバラつくが、海域の特性を反映した値を有している³⁾。C/IL 比の変化は有機物の消化 (C, H, N, S, O の結合または剥離)、離脱 (液化、気化等) が主な要因であり、燃焼減量は気化する CHNSO の総量を表わしている。有機泥の燃焼特性が把握できれば C/IL 比の大きさやその変化は有機物の種類と分解状態を知る情報となる。さらに、不安定有機物は低分子化により物性を変化させるため、有機泥からの離脱のし易さは有機物の消化の程度との関連が大きい。

d) pH-ORP 関係 (有機泥の堆積状態)

地盤内で有機物が嫌気分解して H^+ と e^- が生産されると、pH、ORP は共に低下する。すなわち、pH、ORP の変化は、有機物の分解指標である。図-4 には放流渠から上流に輸送され堆積した有機泥の pH-ORP 関係が示されている。凡例の放流渠付近 (St.1~4) は下水の放流渠出口 (St.3) の周辺を示している。放流渠から離れるとともに ORP が上昇し還元状態が緩和されていることがわかる。ORP の低下は酸化物 (電子受容体) の還元反応を示しており、間隙水の動き等により酸素等の電子受容体の混入がある場では ORP が上昇する。

4. 推定される遡上・堆積有機泥の物理・化学特性

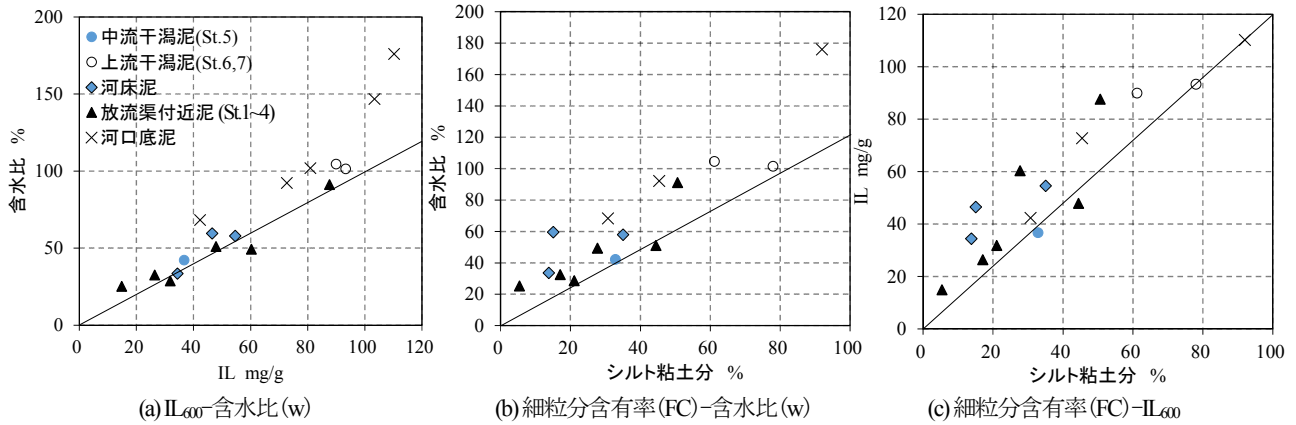


図-5 IL_{600} , w (含水比), 細粒分含有率 (FC) 間の相互関係

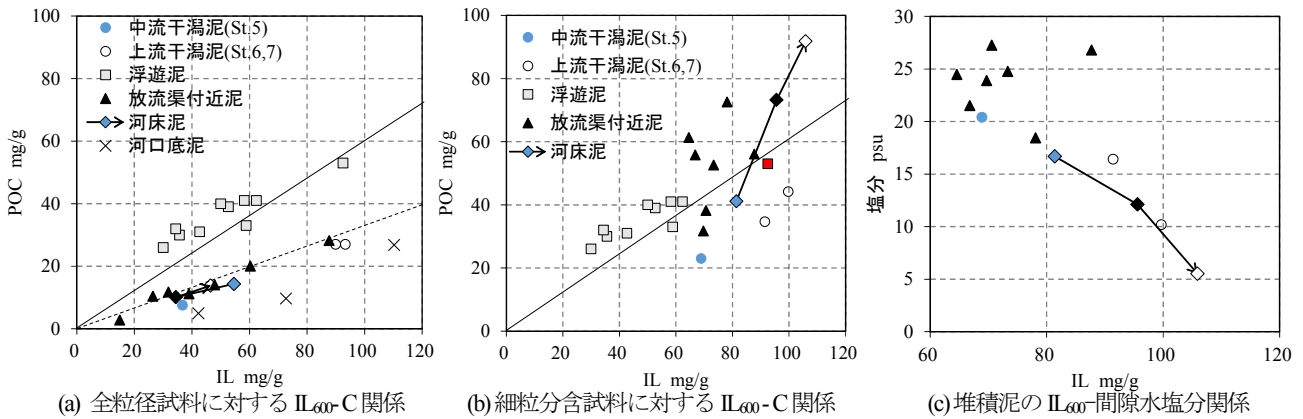


図-6 粒径による C/IL 比の比較と輸送による変化 (河床泥では上流方向に向かって採取位置 (St.5~7) を→で示している)

図-5, 6に市内派川河口 (×) から図-3に示した天満川上流までの間に堆積または輸送される有機泥, 浮遊泥の性状について示した. 各図でデータ数が異なるのは測定項目が同一でないためである. 中流干潟はSt.5, 上流干潟はSt.6, 7, 河床は干潮時のSt.5~7の流水部であり, 上流に向かって→で示している. 市内派川河口堆積泥の細粒分 (75 μ m以下) の中央粒径は10~20 μ mであり, 広島湾奥域堆積泥と同程度の粒度分布である⁴⁾.

(1) 有機物と水分の微細土粒子 (二次鉱物) への付着

図-5 には IL_{600} (mg/g), 含水比 (w , 重量%) と 75 μ m以下の粒子含有率 (FC, 重量%) 間の関係が示されている. IL_{600} , 含水比, 微細粒子含有率の間には一意的な関係が存在していることがわかる. これらの関係は供給される二次鉱物の特性が大きく変化しなければ, 二次鉱物と有機物で構成される個々のフロックの特性に大きな変化が生じないことを示している. これまでに調査した市内派川に堆積する有機泥では $IL_{600} : w : FC = 1.1 : 11 : 10$ 程度の割合で存在している. この比は採取場所や干満, 流れの環境とともに粒子の組成に依存するために, 不安定な有機物の含有量が多い有機泥では FC に対する IL , w が大きい値をとる傾向にある. 天満川 (図-5) においては $IL_{600} : w : FC = 1.2 : 12 : 10$ の割合で有機泥が構成されているのは, 調査地点では下水起源の有機物含有率が

高いことに依存しているためと考えられる.

(2) 粒子を構成する有機物の特性 (C/IL 比)

図-6 に天満川に遡上する有機泥 (浮遊泥) と干潟に堆積する有機泥 (堆積泥) の IL_{600} , POC, 間隙水塩分間の関係を示した. 図(a)には全粒径試料に対する測定値, 図(b), (c)には 75 μ m フルイを通過した試料に対する測定値が示されている. 図(a)では浮遊泥の POC/ IL_{600} (C/IL 比) が堆積泥の 2.5~3 倍にバラついた値を持つが, 細粒分を対象にした図(b)では採取法の異なる有機泥間の C/IL 比の差が減少しており, 市内派川に存在する浮遊泥, 堆積泥とも炭素組成に応じた C/IL 比を示していることがわかる. 図(a)で堆積泥に有機物量が見かけ上少ないのは有機物の付着量が少ない砂成分を含んでいるためであり (図-1), 細粒分のみを対象にすることにより有機泥を構成する有機物の炭素組成を推定すること容易になる.

著者らがこれまでに行った広島県沿岸での堆積泥に関する知見³⁾から 0.6 を越える C/IL 比は下水起源の有機泥の特性として, 0.3 以下の C/IL 比はプランクトン起源の海底堆積泥の C/IL 比の特性として位置付けられる. IL_{600} が 50mg/g 以上で C/IL 比が 0.7 を越える有機泥は下水起源泥に存在しており, 図-6(b)中の実線の勾配 0.6 を越える C/IL 比をもつ有機泥には下水起源泥の含有率が高いと推定できる. C/IL 比は放流後間もない有機泥を含

む放流渠周辺と浮遊泥で高くなっており、放流された下水成分が多く含まれることが推定される。上流に向かって河床泥の C/IL 比が高くなるのは放流された下水成分のうち、飽和高級脂肪酸の含有率が高い有機物が掃流されることを示している。上流に位置する St.6 の干潟に油脂類の多い有機泥が堆積していることから難分解の飽和高級脂肪酸が上げ潮によって輸送されていることを裏付けている。また、IL₆₀₀-塩分 (図(c)) には一意的な関係があり、上流に向って間隙水塩分が低くなっているが、放流渠付近では IL₆₀₀ の大きい堆積泥で塩分が高くなっている。細粒分に含まれる有機物量が 6%程度あると 80%程度 (間隙水塩分/遡上海水塩分) の海水塩分を保持できており、堆積泥では下水成分が多い程有機泥の粘性が高くなっていることが推定される。

5. おわりに

感潮域に堆積する有機泥の性状変化を評価するための指標と分析結果について考察した結果を以下にまとめる。

- (1)有機物は数10 μ mの微細な2次鉱物に付着し易いため、75 μ m以下の細粒分を対象にすることによって有機泥に付着する有機物の特性を理解し易くなる。
- (2)2次鉱物に有機物が付着し、2次鉱物と有機物が構成するフロックに水分が保持され易いため、生産場が同一である2次鉱物では形成される有機泥のIL₆₀₀、含水比、微細粒子含有率の間には一意的な関係が存在する。
- (3)有機物の起源、堆積履歴等に依存して有機泥のC/IL比が異なることから、C/IL比は有機物の炭素組成を推定する指標となる。
- (4)上げ潮初期に河川を遡上する有機泥は、河川水(海水+陸水)の塩分状態により選択的に分別され、飽和高级脂肪酸に代表されるC/IL比の高い有機物が上流に輸送

される。

(5) IL₆₀₀-塩分濃度には一意的な関係があり、有機物含有量の低い堆積泥の間隙水塩分が高くなる特性がある。細粒分に含まれる有機物量が6%程度あると遡上海水の80%程度の塩分を保持できており、下水成分が多い有機泥程、粘性が高くなることが推定される。

参考文献

- 1) 阿部真己, 中下慎也, 日比野忠史: 感潮域における堆積有機泥の巻き上げ機構のモデル化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.67, No.2, pp.1146-1150, 2011.
- 2) Yamamoto, S. and R. Ishiwatari: A study of the formation mechanism of sedimentary humic substances- II. Protein-based melanoidin model, *Organic Geochemistry*, Vol. 14, No. 5, pp. 479-489, 1989.
- 3) 日比野忠史, 太刀内紘平, TOUCH NARONG, 中下慎也: 沿岸域に堆積する有機泥に含まれる有機物の分類法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No.2, pp. I_1101-I_1105, 2014.
- 4) 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.
- 5) 岡村宏信, 小枝豪志, 中下慎也, 日比野忠史: 有機泥の沈降特性とフロック構造による有機泥密度の推定法の確立, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No.2, pp.1031-1035, 2012.
- 6) 西村尚哉, TOUCH NARONG, 駒井克昭, 日比野忠史: 有機性状を考慮した有機懸濁物質の沈降速度のモデル化, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.1151-1155, 2009.
- 7) 中下慎也, 加納一成, TOUCH NARONG, 日比野忠史: 沿岸域に拡散・堆積する油脂類の変動特性の解明, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I_1086-I_1090, 2014.
- 8) 阿部真己, 今川昌孝, 駒井克昭, 日比野忠史: 河川干潮域での有機泥輸送における塩分の働き, 第 54 巻, 水工学論文集, pp.1645-1650, 2010.
- 9) A. S. Michels and J. C. Bolger: The Plastic Flow Behavior Flocculated Kaolin Suspensions, *I&EC fundamentals* 1(3), pp. 153-162, 1962.

(2015. 3. 18 受付)

REMARKS ON PROPERTY MEASUREMENTS OF THE FINE GRAINED SEDIMENT CONTAINING ORGANIC MATTER

Tadashi HIBINO, Yuki MORIMOTO, Shoji FUKUOKA and Akira UEDA

In tidal rivers, sediment is transported from the river mouth to the upstream by sea water intrusion under tidal fluctuations, and accumulates on the river tidal flats under high salinity conditions. This sediment is strongly affected by various motions in the course of bed load transport because of the interactions occurred due to different ion conditions of pore water and flowing water. In this paper, we proposed the texture based on correlations (individual or reciprocal reaction) between physical and chemical conditions, and evaluated properties (organic and accumulation conditions) of sediments accumulated on river tidal flats using observation data and the texture. We also summarized basic indexes and methods for evaluating the sediment properties.