

太田川河口域における有機泥の循環に関する 基礎的研究

Basic Study on the Circulation of Organic Mud in the Ohtagawa Estuary

長戸宏樹¹・越智達郎²・日比野忠史³・福岡捷二⁴

Hiroki NAGATO, Tatsuro OCHI, Tadashi HIBINO and Shoji FUKUOKA

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒451-0046 名古屋市西区牛島町2-5)

²学生会員 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 工博 広島大学大学院工学研究科助教授 社会環境システム (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

⁴フェロー 工博 Ph.D 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)

This paper deals with a circulation mechanism of the organic matter in Ohtagawa estuary connecting to Hiroshima Bay. The samples of the organic mud were obtained from the sediment trap net installed in this area. The circulation of the organic mud is estimated by the variations of the trapped organic mud among the observation points in quality and quantity. The most essential ingredients were particles of 75 micrometers or less. It can be understood that the organic mud is either the primary production origin or the decomposition by comparing the C/N ratio. There was a sharp contrast between Ohtagawa River and Tenmagawa River in terms of the different source of the organic mud from September to October in 2003 because of the different transportation systems between two rivers.

Key Words : closed water area, tidal flat, sediment trap, organic mud, C/N ratio

1. はじめに

平成15年に国, 県, 市が策定した「水の都ひろしま」構想において, 「泳いで遊べる川づくり」, 市内中心部の河川でも水に直接接触し, 水に親しむことのできる空間を再生することを目的の1つとしている。太田川放水路は人工的に造られた河川にも関わらず, 良好な干潟が形成され人々に潤いを与えている。これに対し, 市内派川護岸沿いに, 微細粒子がヘドロ状に堆積しているため, 水際に足を踏み入れがたい状態となっている。放水路にヘドロの堆積が少ないのは高水敷(タイドプール, 植生)の存在が考えられるが, その他に生物の棲息環境を決定付ける重要な要因として微細土粒子と栄養塩によって形成される有機泥(懸濁物質)の輸送形態の違いが挙げられる。有機泥は周囲の環境によって様々に形を変えるために, その挙動を明らかにすることは極めて難しい。特に, 河口域においては潮汐等によって遡上する海水と河川流出水の混合, 懸濁粒子の巻き上げや流動, 底層の貧酸素化等の物理現象や有機物の凝集・離脱, 酸化・還元等の化学的な過程が複雑に絡み合っており, 有

機泥の挙動については定量化されていないのが現状である。

清木ら(1985)¹⁾は広島湾において懸濁物質の量, 有機物濃度を四季に渡り測定し, 濃度は夏季において最大となり, 量は夏季に少なく, 成層崩壊に伴って秋季に集中して増大することを示している。河口域における物質循環に関する研究では流れ場や水質変動に重点をおいた現地観測やシミュレーション²⁾, あるいは, 実験室レベルでの巻き上げ実験³⁾等が主に行われてきたが, 最近では, 有機泥の化学的性状や巻き上げ機構について現地調査結果から検討するものも行われている⁴⁾。

本研究では, 太田川 - 広島湾間の有機泥の循環メカニズムを定量的に把握するための調査手法を確立することを目的としている。広島湾奥~河口域干潟に堆積している泥や輸送される有機泥の量や質の特性を長期的に把握し, それらをもとに, 水温や塩分などの水質との関係や広島湾, 太田川で輸送される泥の組成の変化を定量的に評価することを行った。

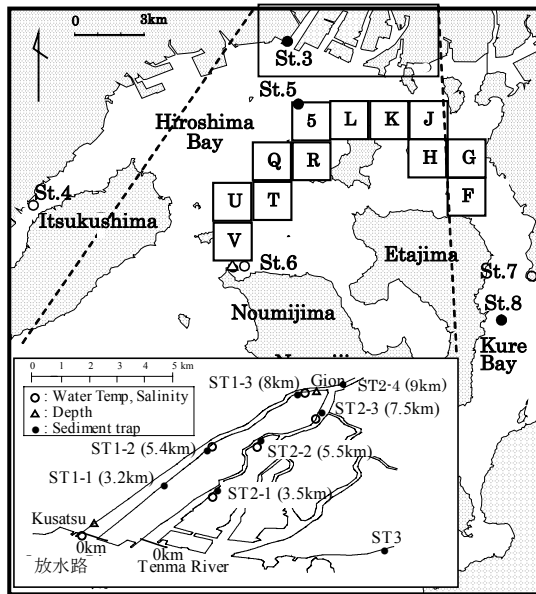


図-1 広島湾、太田川感潮域の地形と観測概要

2. 太田川河口域における有機泥の堆積

(1) 有機泥の循環把握のための調査手法

広島湾奥部と太田川放水路、市内派川内に設置されたセジメントトラップ（河川：φ10cmを上端が地面から30cmになるように埋設，海岸域：φ7cm，6本を干潟面から30cmになるように設置，海域：φ7cmを係留，海底ではφ30.2cmを上端が海底から5cmになるように埋設）網から得られた沈降泥および，セジメントトラップ周辺の堆積泥の土質特性，含有成分と周辺水域の塩分・水温の変動特性を検査することによって沈降する有機泥の特性が把握された。なお，設置方法はセジメントトラップ量等から決定している⁵⁾。

図-1には太田川感潮域の地形および調査地点（St. 1～8）が示されている。太田川放水路は高水敷を有する複断面であるのに対し，市内派川は単断面の地形である。セジメントトラップは河道内（St. 1，St. 2），海岸域

（St. 3）では水際に，海域は2003年度ではSt. 8において海底0m，海底面上+1m,+17mに，2005年度ではSt. 5において海底0m，海底面上+1m,+3m,+5m,+7m,+9mに設置された。設置海域の平均水深はSt. 5では15m，St. 8では22mである。放水路内では，河口から約3.2km（St. 1-1），約5.4km（St. 1-2），約8km（St. 1-3），市内派川では，天満川約3.5km（St. 2-1），約5.5km（St. 2-2），旧太田川約7.5km（St. 2-3），太田川約9km（St. 2-4）の干潟面に設置された。さらに，セジメントトラップとともに塩分・水温計が設置されている（図-1）。水温・塩分の設置標高はセジメントトラップの設置位置に準じている。また，水位（水深）は海域（St. 4，St. 6，St. 7），放水路5.4km，草津，祇園，長和久（国土交通省）等で測定されている。セジメントトラップの設置期間は海域（St. 5，St. 8）では15日間，海岸（St. 3）と放水路

（St. 1），市内派川（St. 2）では15日～30日間を基準としている。海域でのセジメントトラップ回収・再設置時には多項目水質計により水質（塩分・水温・濁度等）が観測されている。セジメントトラップに捕捉された有機泥では，粒度分布，クロロフィル-a，フェオフィチン，POC，PON，POP，SSが測定された。これらの測定に併せて，放水路，市内派川の各地点では，干潟堆積泥の粒度分布および強熱減量が測定されている。

(2) 河口域での有機泥の沈降量

図-2はセジメントトラップ沈降量の経時変化を示している。2003年～2005年では特に台風が多く上陸した2004年の9～11月に沈降量は多く，各地点の最大値は太田川放水路側のSt. 1-1で約28 g/m²/h，St. 1-2で約22 g/m²/h，St. 1-3で約20 g/m²/hであり，市内派川側のSt. 2-1で約50 g/m²/h，St. 2-2で約72 g/m²/h，St. 2-3で約51 g/m²/hであった。平常時においても数g/m²/hの沈降量があり，冬期から春期（12月～3月）では沈降量が数g/m²/hと夏期と比べ1/10のオーダーでしかない。また，分流前のSt. 2-4における沈降量は，2004年では7月に沈降量が減少し市内派川と傾向が似ており，2005年では2004年に比べ沈降量が少な

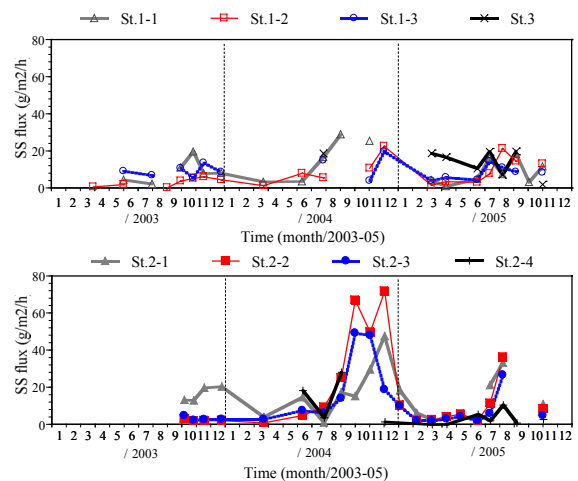


図-2 セジメントトラップ沈降量の経時変化

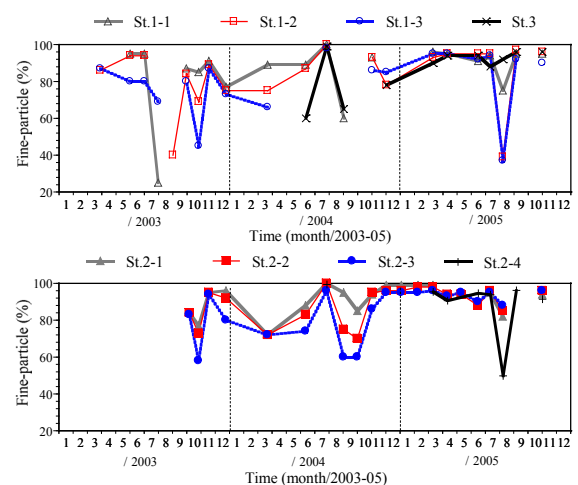


図-3 セジメントトラップ中の75µm以下の粒子が占める割合

く太田川放水路に似ているため、太田川の出水状況や海水の遡上と沈降の関係が強いことが示唆される。

図-3は太田川放水路、市内派川におけるセジメントトラップ堆積泥中の75 μm以下の粒子の割合を示している。セジメントトラップに沈降する粒子の8割程度が細粒分(粘土・シルト)であり、2003年8月や2004年7, 10月, 2005年7月の含泥率の低下は洪水による浮遊砂分の捕捉によるものであるが、その低下率が太田川放水路(St. 1系)と市内派川(St. 2系)で異なり、太田川放水路の方が変動幅は大きく、不規則である。また、St. 1-2とSt. 1-3やSt. 2-2とSt. 2-3では細粒分含有率の差は小さいが、場所ごとに構成比に特色があるといえる。各河川で縦断的にみると、河口に近いSt.1-1やSt.2-1で含泥率が高くなっており、上流に向かうにつれ低くなる傾向にある。

(3) 河口干潟上の有機物量

図-4は太田川河川流量とSt. 1-2における日平均塩分濃度、図-5は(a)太田川放水路、(b)市内派川、河川干潟堆積泥の強熱減量の経時変化を示している。河口間の水平距離は2km以下であるが、太田川放水路よりも市内派川に形成される干潟で有機物量を多く含有されている。経時的な変化の傾向も異なっており、放水路では水門～中流域での変化が大きくなっている。なお、2004年9月で大きく減少しているのは、TY0416とTY0418による高潮・洪水によって、短期間に断続的に河川水量が増加したためである。市内派川では河口に近づくにつれて、強

熱減量は高くなっているのに対し、放水路では上流部で大きい傾向にある。この分布特性は通常時に起こる放水路への海水の逆上と関係しており、河川に遡上する海水が湾奥部(河口域)に堆積した有機物を輸送するためと考えられる(海水の遡上形態は次章で述べる)。また、両河川とも洪水によって表層有機泥が流出されているが、その傾向は放水路において強くなっている。太田川放水路では、河川流出直後には、土砂の輸送や堆積泥の掃流、海域からの有機泥の供給が制限されるため、強熱減量は1%程度と低くなっている。一方、市内派川では、高潮による河口での有機泥の掃流(2004. 9)を除けば、洪水の影響は中流域程度までである。太田川放水路に比べ、市内派川で泥の供給が多く(図-3)、洪水時には放水路と比較して流量が少ないために土砂の輸送や掃流力が弱くなり、堆積量の違いが現われたと考えられる。

3. 広島湾奥部・太田川の塩分変化特性

(1) 平水時における太田川感潮域への海水の遡上特性

図-6は平水時の太田川放水路と、市内派川における海水の遡上頻度を示している。河口からの距離が同程度(約5.5km)にある太田川放水路では淡水の影響が弱いものに対し、市内派川では河川水の影響が強く現れていることがわかる。平水時には市内派川への海水の遡上は放水路と比較して弱く、市内派川干潟上には干満とともに低塩分水と海水が流出入している。

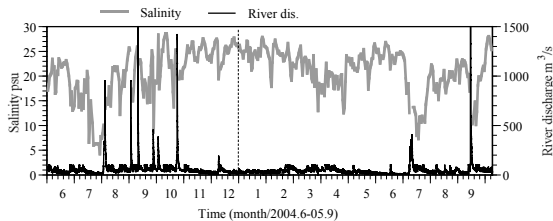
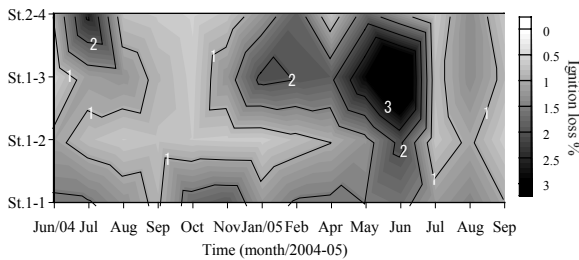
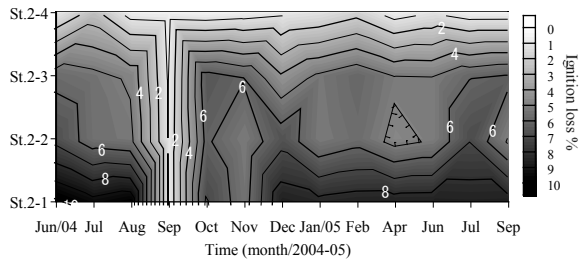


図-4 河川流量とSt.1-2における日平均塩分濃度



(a)太田川放水路—太田川



(b)市内派川(天満川—旧太田川—太田川)

図-5 干潟堆積泥の強熱減量値の経時変化

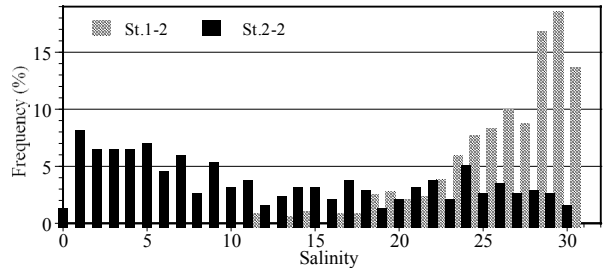


図-6 平水時の太田川放水路、市内派川における海水の遡上頻度

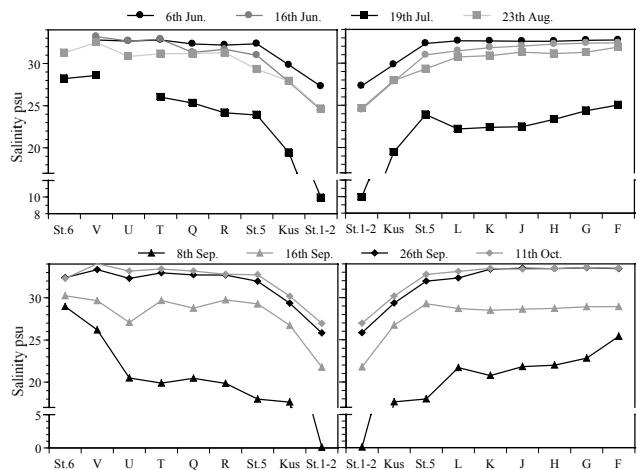


図-7 広島湾奥部における塩分濃度の空間分布(2005)

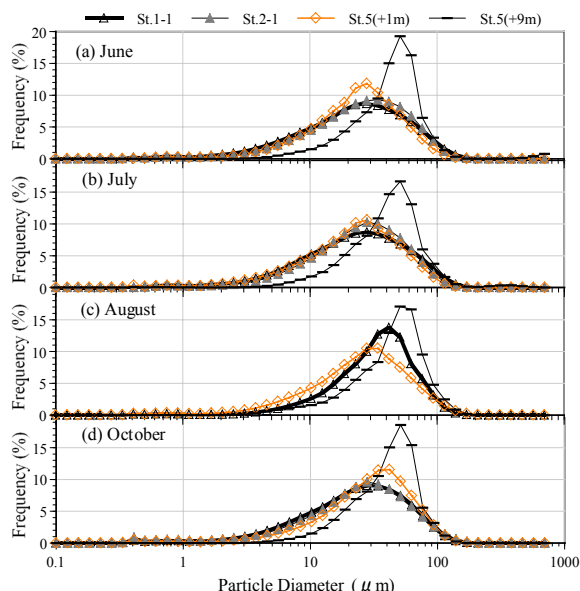


図-8 放水路，市内派川，海域での沈降泥の粒度分布

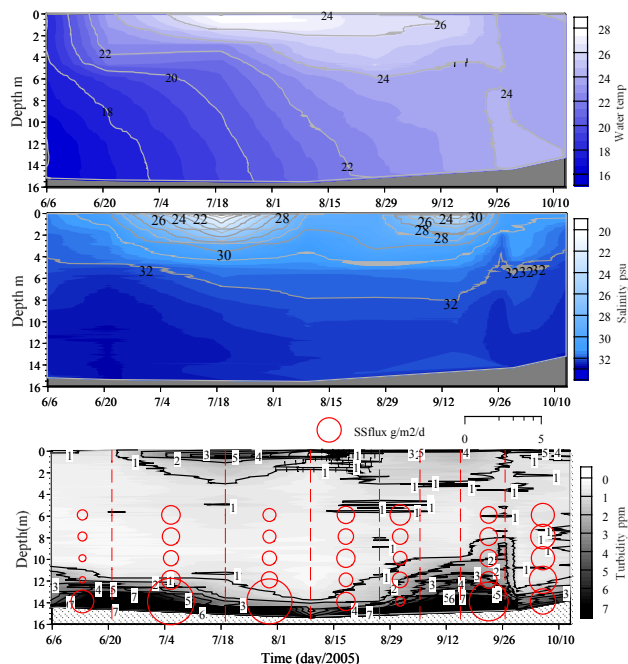


図-9 St.5における水質と沈降泥の経時変化

(2) 出水時における河川水の広島湾に与える影響

図-7は2005年6～10月の太田川放水路～広島湾奥部における塩分濃度の空間分布を示している（図中のローマ字は図-1に示した海域に対応している）。出水前の6月6日や6月16日には広島湾内はほぼ一様で32 psu前後であるが、7月の出水後の7月19日には低下し、河口沖（St. 5）から約1.6 psu/kmの勾配で能美島（St. 6）に向かって低下している。同時期の呉湾ではSt. 6よりも3psu程度低く、また地点Lで低く地点Fまでに約2psuの上昇でしかない。St. 5よりも地点L以东（地点L, K, J）で塩分濃度が低いことから、淡水が多く流入していることが言える。一方、台風による出水1日後の9月8日には地点Uまでは低下しているが、St. 6では7月の出水と同程度である。また、St. 6方向に向かっては地点U、呉方向に向かっては地点Hまでの範囲で比べると、St. 6方向に向かって塩分濃度が低くなっていることがわかる。

4. 広島湾における有機泥の堆積

(1) 太田川～広島湾の沈降泥の粒度分布

図-8は(a)2005年6月、(b)7月、(c)8月、(d)10月の太田川、広島湾奥（太田川河口，St. 5）におけるセジメントトラップ沈降泥の粒度分布を示している。全期間を通じて上層(海底+9m，平均海面下6m)では他地点と粒度組成が異なり、粒径50～60 μ mの粒子が多く存在している。太田川からの断続的な出水があった7月では、底層(海底+1m)と太田川の分布が類似している。8月におけるSt.1-1では、海底上層(+9m)で沈降する有機泥の分布形状に近づいて（粒径の大きな沈降泥の増加）おり、海域上層で形成された有機泥の影響が河口域で現れていることが考えられる。海域底層（+1m）では、10月に粒径の大きい

沈降泥が存在しており、成層崩壊後に上層からの沈降量が増大していることが示される。

(2) 海域における有機泥の変動特性

図-9は2005年6月～10月の太田川河口（St.5）における水温と塩分、濁度の鉛直分布とセジメントトラップ沈降量の経時変化を示している。下図中の破線が観測日であり、SS沈降量（円の直径は捕捉量を示す）は各観測日間の捕捉量から算出した。海域底層（+1m）では8月で沈降量が約1.7g/m²/dとなっており、8月末や10月をはじめを除いた期間でセジメントトラップ捕捉量は下層に近づくほど、大きな値を示している。水温や塩分の鉛直方向の差がなくなり、密度成層が崩壊した10月では海底層で粒径の大きい有機泥が存在（図-8）しているとともに、各層で沈降量（SSフラックス）は約0.5g/m²/dと同様になっている。海底面上+3mでは、沈降量の増加が見られない。これらのことは、底層での濁度の増減は上層からの粒子の沈降よりも、海底堆積泥の巻き上がりなどの現象に引き続くものであることを示している⁶⁾。

5. 有機泥循環の検討

(1) セジメントトラップ沈降泥の沈降速度

有機泥の河道上流への輸送距離を明らかにするため、河口干潟に設置したセジメントトラップに捕捉される沈降泥の沈降速度を検討した。河川干潟（St. 1-2）に設置されたセジメントトラップの側面（干潟面上0cm）に濁度計を設置し、10分間隔でセジメントトラップ中の濁度を測定した。

図-10はセジメントトラップ内の粒子の沈降イメージ

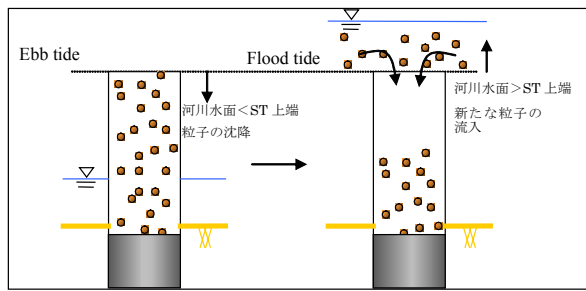


図-10 セジメントトラップ内の粒子の沈降イメージ

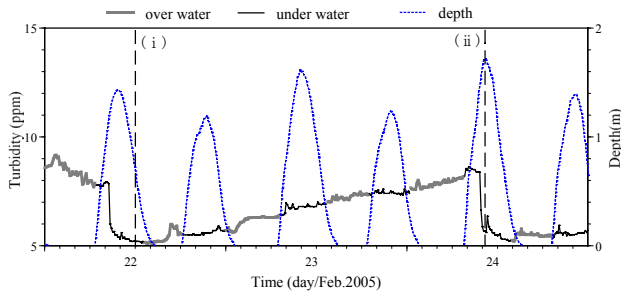


図-11 セジメントトラップ内の濁度と河川水位の経時変化

を示している。干潟に設置されたセジメントトラップは上端が干潟面上30cmの高さになるように設置されているため、水位がセジメントトラップ上端よりも低くなると、冠出し、次の冠水まで新たな粒子の流入はない。そこで図-10に示すように、冠出後から次の冠水までの間にセジメントトラップ内の粒子は沈降し、次の上潮以降に粒子の沈降がない場合には、濁度の変化から、粒子の平均的な沈降速度が算出できる。図-11は2005年2月22～24日の濁度と水位の時系列変化を示している。図-11中の(i)の時点で粒子がセジメントトラップに入り、その粒子が(ii)の時点まで濁度計センサの上部30cmの間に粒子が存在していたことから沈降速度は最大0.19m/dと見積もられる。さらに、St. 1-1付近での流速は±10～30cm/sである⁷⁾ことを考えれば、河口から流出した粒子は1潮汐中流域まで輸送されることになる。

(2) 植物プランクトン起源の有機泥循環

a) 循環解明手法の考察

一次生産起源の有機物量は分解速度や無機化速度の違いで区分すると次式のように定式化される⁸⁾。

$$C_T = C_{01}[\exp(-k_1t)] + C_{02}[\exp(-k_2t)] + C_{NR}$$

ここで、 C_{01} はfast-labile fraction、 C_{02} はslow-labile fraction、 C_{NR} はrefractory fractionである。このモデルでは、有機物量は2つの異なる分解速度を持つFraction(C_{01} 、 C_{02})と生物反応に強い抵抗力を持つFraction(C_{NR})とに区分されている。永尾ら(2005)⁹⁾は、広島湾奥部における一次生産起源の有機物中の各fraction量 C_{01} 、 C_{02} 、 C_{NR} を現地調査および室内実験によって $C_{01}=50\%$ 、 $C_{02}=16\%$ 、 $C_{NR}=34\%$ 、 $N_{01}=67\%$ 、 $N_{02}=11.3\%$ 、 $N_{NR}=21.7\%$ と算出した。本節では一次生産による有機物の分解性の違いを

考慮し、セジメントトラップに沈降する有機泥循環把握手法について考察した。図-12は太田川におけるセジメントトラップ沈降泥の懸濁態窒素と懸濁態炭素の関係を示している。破線は河川流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下の期間のセジメントトラップ沈降泥中の最大C/N比(=12.024)、太線は永尾らによるfast-labile fractionを除いたC/N比(=10.0)、実線はRedfield ratioから換算したC/N比(=6.625)である。C/N比が10以下の値を有する有機泥は、易分解小生の有機物を含んでいるといえる。図-12から市内派川よりも太田川放水路でC/N比の小さな沈降泥が多く、海水の遡上形態(図-6)からも広島湾内で生成された植物プランクトンの影響を強く受けていることがわかる。C/N比とともに設置時期や海水の遡上形態を加味することで、C/N比が一次生産を起源とした有機泥の循環を検討する。

b) C/N比の空間分布

図-13は2003年9、10月の太田川、呉湾沖(St.8)におけるC/N比と両期間でのC/N比の変化率の空間分布を示している。粒径の大きい有機泥の沈降があった上層での9月のC/N比は約6を示しているが、10月になるとC/N比が大きくなり、逆に底層でのC/N比が小さくなっている。表層でのC/N比の変化は、St.1-1とSt.1-2でも観測されている(9月のC/N比は約10)が、市内派川ではC/N比の顕著な変化は観測されていないことがわかる。C/N比の比較と海水の遡上形態から、太田川放水路内で沈降する有機泥は海域から輸送されている。これに対し、天満川河口で沈降する有機泥はC/N比が大きく、分解の進んだ泥がセジメントトラップに捕捉されていると考えられる。

図-14は2005年6～10月の太田川、太田川河口沖(St.5)における経時的なC/N比の空間分布を示している。空白は洪水などによるデータの欠損である。図-8より捕捉された有機泥に粒径の大きな粒子が存在するSt.5上層(9m)では、C/N比が6～7であり、植物プランクトン由来の新鮮な泥が多く含まれているといえる。さらに、8月のSt.1-1、St.1-2ではC/N比が小さくなっており、粒度組成(図-8)もSt.5上層(+9m)に近いことから、この期間は広島湾から太田川放水路へ有機泥が輸送されたと考え

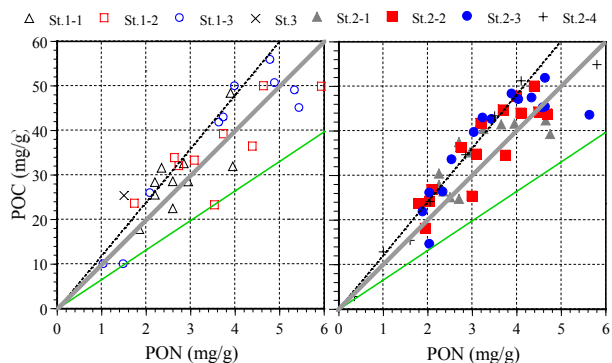


図-12 セジメントトラップ堆積泥の懸濁態炭素と懸濁態窒素の関係

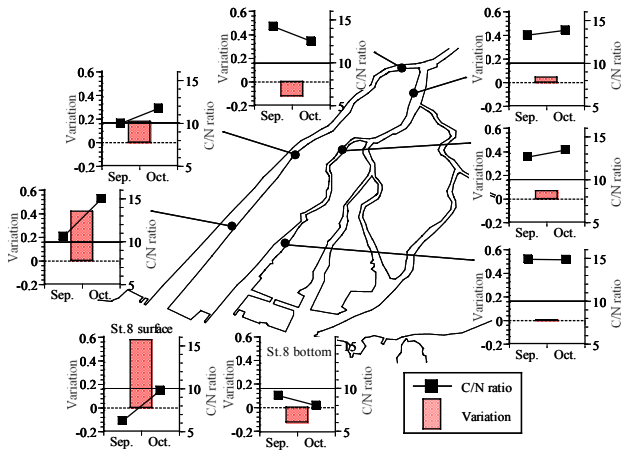


図-13 2003年9～10月の太田川，呉湾沖 (St.8) におけるC/N比とC/N比の変化率の空間分布

られる。なお、断続的な出水があった7月にはC/N比の小さな粒子が天満川で捕捉されている (図-2) が、沈降泥には砂分も多く含まれている (図-3)。沈降泥には砂分が多く含まれ、これらのことから、上流の影響が大きく海起源の有機泥とは言えない。

6. 結論

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 太田川放水路，市内派川においてセジメントトラップに捕捉される量は市内派川で多く，その細粒分含有率は平水時ではともに 8 割程度である。また，季節的には冬期から春期の沈降水量は夏期の 1/10 程度であり，洪水時における細粒分含有率の低下は太田川放水路で顕著である。有機物量は細粒分を多く含む市内派川で多く，その縦断分布は各河川で異なる。
- (2) 平水時では放水路と市内派川では海水の遡上距離が異なる。特に太田川放水路において，河口から中流域で干潮時に塩分の低下が観測されているときには，上流への海水の遡上が制限される。
- (3) 広島湾奥部の上層においてセジメントトラップに捕捉される粒子の粒度分布と太田川のを比較すると，広島湾上層では粒径の大きな粒子を含んでおり，その影響は太田川河口においても見られる。
- (4) 太田川河口干潟に設置されたセジメントトラップ内の濁度を測定することで，セジメントトラップに沈降したある粒子の沈降速度を簡易的に算出できる。底面上 5cm の位置にある粒子は，太田川河口から約 5km まで輸送されうるとを示した。
- (5) 太田川～広島湾における C/N 比の分布と河川遡上形態から，2003 年度では太田川放水路内に沈降する有機泥は海域から輸送され，市内派川河口に沈降する有機泥は C/N 比が大きく，分解の進んだ泥が輸送されていると考えられる。

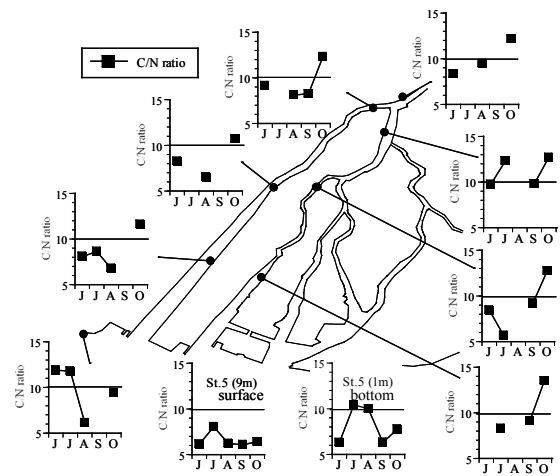


図-14 2005年6～10月の太田川，河口沖 (St.5) におけるC/N比の空間分布

謝辞：本論文では，国土交通省中国地方整備局の所管する瀬戸内海総合水質調査データ，海面清掃船「おんど 2000」による水質測定データおよび矢口第一 (太田川) 水位を用いている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 清木徹，伊達悦二，伊澤博文：広島湾におけるセディメント・トラップ捕集物から推定した水中懸濁物の沈降フラックス，水質汚濁研究 第 8 巻 第 5 号，pp.304-313，1985。
- 2) 村上和男，鶴谷広一，入江功：熊本港のシルテーション機構に関する現地調査および数値計算による検討，第 7 回沿岸域及び海洋の利用に関するシンポジウム，1991。
- 3) 鶴谷広一，江口秀二，鷹濱潤：流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究，海岸工学論文集第 35 巻，pp.357-361，1988。
- 4) 山下俊彦，森田真郷，杉原幸樹，斎藤大作，山崎真一：石狩川河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集過程に関する研究，海岸工学論文集第 49 巻(2)，pp.1016-1020，2002。
- 5) 日比野忠史，松本英雄，西牧均，村上和男：干潟浄化能力の定量的評価手法の提案，海岸工学論文集第 50 巻，pp.1071-1075，2003。
- 6) 日比野忠史，松本英雄，水野雅光：太田川デルタ地下水の流動と海底高濁度層の形成，海岸工学論文集第 53 巻，2006
- 7) 川西澄，筒井孝典，中村智史：太田川放水路における土砂動態と底質変動，海岸工学論文集第 52 巻，pp.906-910，2005。
- 8) Joseph T. Westrich and Robert A. Berner: The role of sedimentary organic matter in bacterial sulfate reduction: The G model tested, Limnol. Oceanogr., 29(2), pp.236-249, 1984.
- 9) 永尾謙太郎，日比野忠史，松本英雄：広島湾における有機物の変動解析と栄養塩生成形態の把握，海岸工学論文集第 52 巻(2)，pp.916-920, 2005.10.

(2006. 9. 30受付)