

広島湾奥域における有機懸濁物質の沈降特性

佐々倉諭*・日比野忠史**・高御堂良治***・村上和男****・松本英雄*****

底質の悪化が進んだ広島湾奥域において、成層期から混合期を含む2002年8～9月、2003年8～10月の間、セジメントトラップや濁度計等を設置し、有機懸濁物質の沈降特性について検討した。混合期の沈降フラックスは、成層期と比較して上層で大きく、底層、海底で小さくなった。成層期の海底には高濁度層が見られ、小潮期に発達し、大潮期には衰退した。有機懸濁物質の分解速度、沈降速度を用いて、下層～海底に存在する上層起源物質の割合を算定した結果、成層期には0.02～8%, 混合期には11～47%となった。混合期に上層起源物質の割合が高くなる理由は、成層の崩壊による上層の沈降フラックスや沈降速度の増加が考えられた。

1. はじめに

海水中の有機懸濁物質は、主に動植物プランクトンやその遺骸によって構成されているが、分解しながら沈降・堆積し、汚泥の形成要因となる。広島湾における有機懸濁物質は、成層が崩壊する9～10月に集中して沈降することが報告されている(清木ら, 1985)。

また、内湾域の海底には高濁度層がしばしば形成され、広島湾でもその存在が認められている。広島湾における海底高濁度層の形成については、上層の生物生産を反映したもの、波や流れによる底泥の再懸濁によるものが報告されている。谷本・星加(1991)は、江田内湾における海底高濁度層の形成、消滅は表層のPOC、PON濃度の変動と良く一致したが、底層の流速は最大6.5 cm/sと弱く、底層の流れと濁度の変動には明瞭な関係は認められなかったことから、海底高濁度層は表層における生物生産に由来する沈降物によって形成されると推測している。一方、朱ら(1999)は、太田川河口沖合において、底層流速と濁度の連続観測を行った。その結果、台風の接近により流速が15 cm/sを超えると、底泥の再懸濁が生じること、海底濁度は流れの強い大潮期に高く、流れの弱い小潮期に低くなることを明らかにした。

有機懸濁物質は、汚泥や海底高濁度層の形成要因と考えられるが、有機懸濁物質の沈降量と海底濁度の変動について、長期間にわたって研究された例はない。本研究では、底質の悪化が進んだ呉湾において、セジメントトラップや濁度計等を設置し、有機懸濁物質の沈降特性について検討した。

2. 調査および解析

(1) 現地調査

広島湾の奥部に位置する呉湾(St. 1; 平均水深22 m)において、夏季の成層期から秋季の混合期を含む、2002年8～9月、2003年8～10月に現地観測を行った(図-1)。懸濁物質の沈降量や性状を調べるため、上層(海底上17 m)、下層(海底上1 m)、底層(海底上0.5 m)、海底(埋設式)にセジメントトラップを設置し、約15日間隔で懸濁物質を捕集した(図-2)。海底のトラップは底泥の混入を防ぐために、上端部が海底上3 cmとなるように設置した。上層から底層には、直径10 cm、高さ20 cmの円筒形捕集器を各層6個設置し、その合計を各層の捕集量とした。海底には、直径30.2 cm、高さ31.5 cmの円筒形捕集器を3個設置し、捕集された沈降物の捕集量が中位のを分析に供した(2002年は1個のみ)。捕集された懸濁物質について、SS(懸濁物量)、POC(粒状態有機炭素)、PON(粒状態有機窒素)、

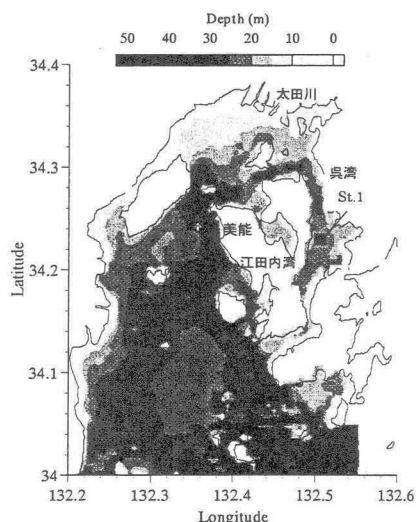


図-1 広島湾の地形・水深と調査地点

*	農修	国土環境(株) 大阪支店 環境技術グループ
**	正会員 工博	広島大学助教授大学院工学研究科社会環境システム専攻
***	学生会員	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
****	正会員 工博	武威工業大学教授工学部都市基盤工学科
*****	正会員 工修	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

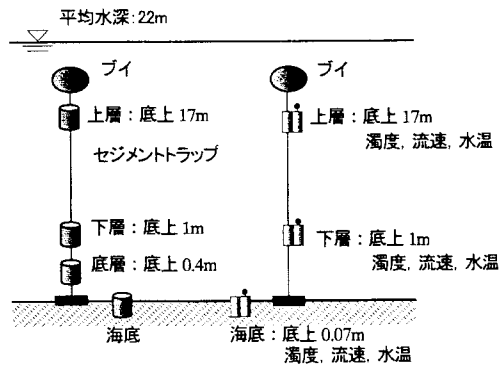


図-2 機器設置状況

表-1 調査内容一覧

内 容	年/月/日	層	項 目
流 況	02/8/20～9/24	海底	流向・流速、 水温
	03/8/19～10/20	上層、下層、 海底	
濁 度	03/8/19～10/20	上層、下層、 海底	濁度
沈降物	02/8/20～9/20 (2回)	上層、下層、 底層、海底	SS、POC、 PON、POP 粒度分布
	03/8/20～10/20 (3回)		
水質(機器)	03/8/19, 9/12, 9/18, 10/3, 10/20	0.1m 間隔	水温、塩分、 濁度、chl.a
水質(採水)	03/8/19, 9/18, 10/20	上層、上層	SS
底 質	03/8/19, 9/18, 10/20	底泥表層	粒度分布

POP (粒状態有機リン) および粒度分布の測定を行った。また、懸濁物質の挙動を把握するため、流速計、濁度計を上層 (海底上17 m)、下層 (海底上1 m)、海底 (海底上0.07 m) に設置した。その他、多項目水質計による水質の鉛直測定等を実施しており、本稿で用いたデータについて、調査内容等を表-1 に示した。

(2) 沈降フラックス・沈降速度の算出

懸濁物質の沈降フラックス (F) は以下の式で求められる。

$$F = \frac{R - C_0 V}{AT} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 R :トラップ内の捕集量、 C_0 :周辺海水に含まれる物質濃度、 V :捕集器容積、 A :捕集器開口部断面積、 T :捕集時間である。ただし、2002年の全項目、2003年のPOC、PON、POPについては C_0 を測定していないために、 $C_0 = 0$ として求めた。さらに、 F を C_0 で除することによって、平均的な沈降速度 (W) を求めることができる。ただし、下層から海底までのトラップ捕集量は底泥の巻き上げによる影響を受けている可能性が考えられたため、巻き上げの影響が小さい上層の値を用いた。

3. 結果と考察

(1) 濁度の経時変化

2002年8月20日～9月24日における水温、2003年8月19日～10月20日における水温、濁度、流速の経時変化 (日平均値) を図-3、図-4 に示す。図-4の潮差は別途底泥内に設置された深度計のデータより求めたものである。なお、2002年には呉湾の上層水温を測定していないため、美能の海面下4 m において別途測定された水温を示した。

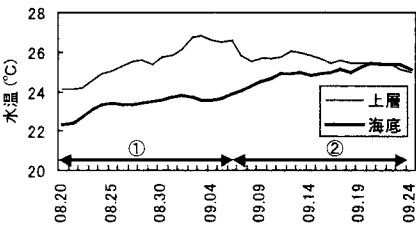


図-3 2002年の日平均水温経時変化
図中の矢印と番号はトラップ設置期間を示す

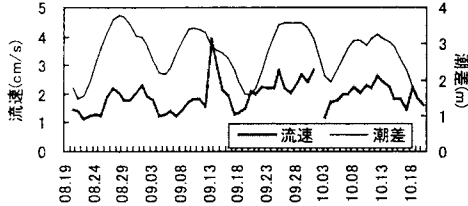
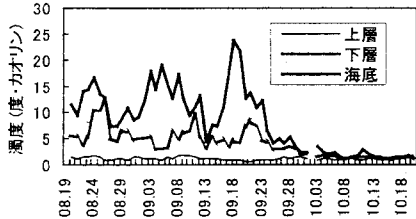
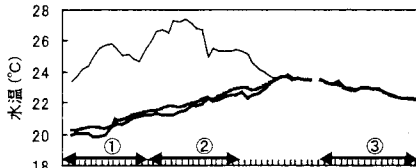


図-4 2003年の日平均水温・濁度・流速と潮差の経時変化
図中の矢印と番号はトラップ設置期間を示す

2002年の美能上層水温は、9月3日頃まで上昇し、その後下降する。美能上層と呉湾下層の水温差は、トラップ設置1回目 (8月20日～9月6日) は、1～4℃であり、2回目 (9月6日～9月24日) に入る頃から、水温

差が小さくなり始め、9月20日頃には見られなくなった。2003年の水温は、上層では9月10日頃まで上昇し、その後下降する。下層、海底では9月27日頃まで上昇し、以降は上層から海底まで、ほぼ一様な値となった。このことから、2002年1回目は成層期、2回目は成層期から混合期への移行期、2003年1、2回目は成層期、3回目は混合期と見なすことができる。

2003年の調査結果から、海底流速と濁度の変動について述べる。海底流速は、潮差の小さい小潮期に小さく、潮差の大きい大潮期に大きくなる傾向を示している。調査期間中の平均値は1.9 cm/s と比較的小さい値となっている。9月13日頃には台風14号の影響を受けて、瞬間値では約10 cm/s の値を示した。濁度について見ると、成層期における下層、海底の濁度は上層よりも高く、成層の崩壊とともに低くなる。海底の濁度は流速が大きくなると、底泥の巻き上げによって高くなることが考えられるが、本調査地点では逆に海底流速の小さい小潮期に高くなっている。また、海底の水温が低いときに濁度が高くなる傾向が見られる(田多ら, 2004)。成層期の下層の濁度は、海底よりも低く、海底より数日遅れて高くなっている。

(2) クロロフィル、濁度の鉛直分布

2003年の調査結果から、水温、塩分、クロロフィル a、濁度の鉛直分布を図-5 に示す。8月19日、9月2日、9月18日には、水深5 m 付近で水温、塩分の鉛直勾配が大きく躍層が発達している。また、海底上1 m 付近にも水温と塩分の勾配が見られる。10月3日、10月20日には、水温、塩分の鉛直勾配は小さくなっていった。クロロフィル a について見ると、8月19日、9月2日、9月

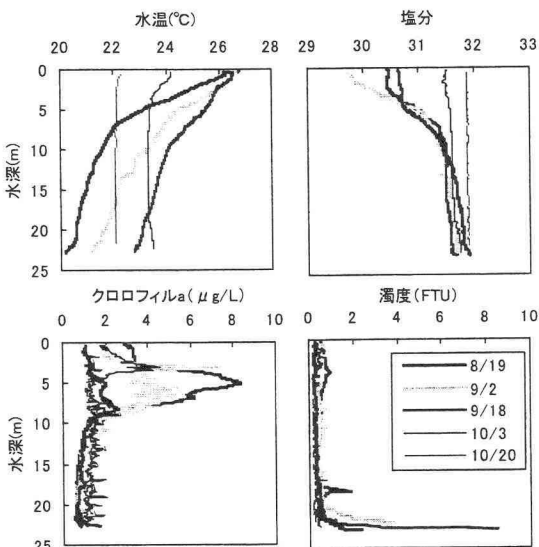


図-5 水温、塩分、クロロフィル a、濁度の鉛直分布

18日には躍層付近に極大値が見られる。10月3日、10月20日には鉛直的にはほぼ一様となり、10 m 以浅では8月、9月よりも低いが、それ以深では高くなっていた。濁度は、水深0~20 m 付近までは、ほぼ一様な値となっているが、8月19日、9月2日、9月18日には海底1~2 m 付近に高濁度層(海底高濁度層)が形成されていた。

(3) トラップ捕集物の組成

セジメントトラップ捕集物の有機物含有量を図-6 に示す。有機物含有量は2002年9月24日のPOCを除き、上層で高く下層~海底で低くなっており、海底に近づくにつれ分解が進んでいる傾向が見られる。2002年の成層期(9月6日)と移行期(9月24日)のPOC, PONを比較すると、上層では、成層期に高いが下層では移行期に高くなっていた。2003年の成層期(9月2日、9月19日)と混合期(10月20日)を比較すると、POC, PON, POPともに上層では成層期に高く、下層~海底では、同じ程度であった。上層における有機物含有量は2002年よりも2003年の方が高くなっていた。

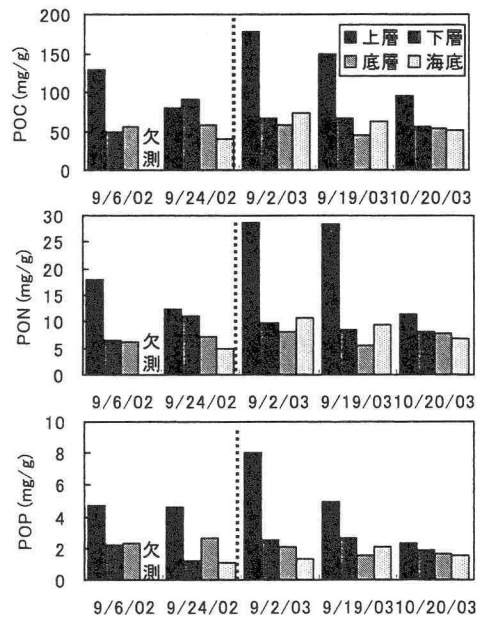


図-6 トラップ捕集物の有機物含有量

トラップ捕集物と底泥(泥深0~2 cm)の中央粒径を図-7 に示す。中央粒径は上層で大きく、下層~海底で小さい傾向が見られる。海底の中央粒径は、底泥とほぼ同じ値を示していた。上層の中央粒径は成層期に大きく、移行期、混合期に小さい傾向が見られる。上層では粒径の大きいプランクトン態の懸濁物質が多く、下層~海底では底泥に近い細かな懸濁物質が多いことが伺える。有機物含有量が高かった2003年の方が2002年に比べて中

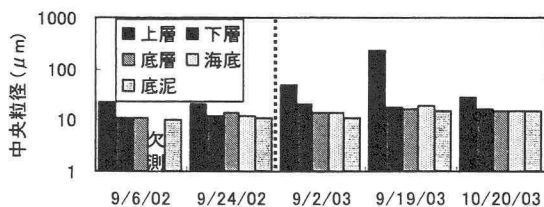


図-7 トラップ捕集物と底泥の中央粒径

中央粒径が大きくなっており、プランクトン態の懸濁物が多く含まれていたことが考えられる。

(4) 沈降フラックス

セジメントトラップ捕集量より得られた、沈降フラックスを図-8に示す。沈降フラックスは全項目とも、上層で小さく、下層～海底で大きい傾向が見られる。成層期(2002年9月6日, 2003年9月2日, 9月19日)と、移行期(2002年9月24日), 混合期(2003年10月3日)を比較すると上層の値は成層期に小さく、移行期, 混合期に大きくなる傾向を示し、移行期に顕著であった。底層, 海底では混合期に小さくなる傾向を示した。下層の値は、成層期と比較して、移行期に大きく、混合期はやや大きいと同程度であった。また、2003年の上層で得ら

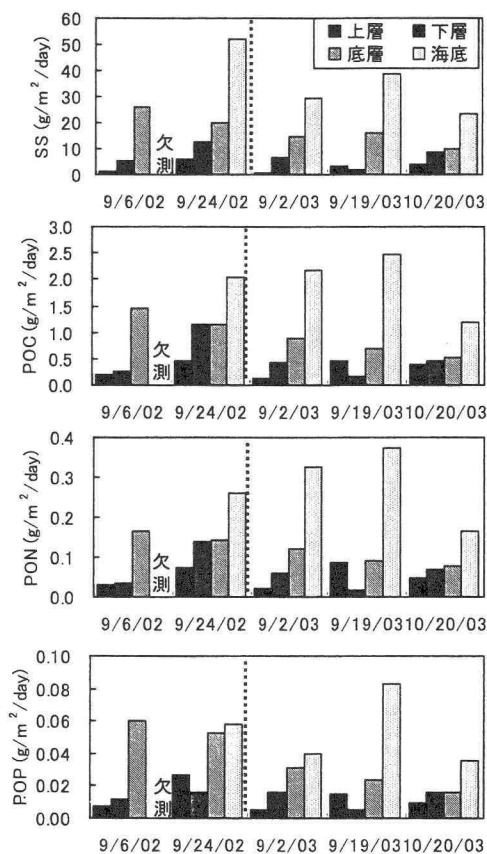


図-8 沈降フラックス

れた懸濁物質(SS)の沈降速度は9月2日が 0.2 m/day , 9月19日が 0.6 m/day , 10月20日が 0.9 m/day となった。谷本・星加(1994)は、江田内湾において、海底付近の懸濁粒子の沈降速度を水中カメラによって実測した結果、沈降速度は $1.7 \sim 259 \text{ m/day}$ の範囲にあり、10月初旬から2月中旬における沈降速度は、6月下旬よりも3~4倍程度大きくなることを示した。本調査結果は、海中内を昇降する粒子の沈降速度の平均値を示しており、値そのものは大きく違っているが、秋季から冬季にかけて沈降速度が増加する点に関しては一致している。

(5) トラップ捕集物の起源の分画

沈降フラックスは上層よりも下層～海底で大きくなる傾向が見られた。有機懸濁物質は分解作用を受けながら、海底に到達するため、上層よりも海底付近で沈降フラックスが大きいことは、底泥の再懸濁起源物質か、堆積せずに海底付近に漂っている物質等の影響を受けていることを示している。そこで、有機懸濁物質の分解過程を考慮して、下層～海底の懸濁物質について上層起源とその他起源(再懸濁起源等)に分画することを試みた。

第*i*層における懸濁物質質量 $C_U(i)$ は、上層における懸濁物量を C_0 、分解速度定数を k 、上層から第*i*層までの到達時間を t とすると、以下の一次反応式で示される。

$$C_U(i) = C_0 \cdot e^{-kt} \dots\dots\dots (2)$$

実際の捕集量 $C(i)$ と $C_U(i)$ との差をその他起源の物質とした。 t は先に求めた沈降速度から算出した。分解速度定数は、POPについては、堀江ら(1986)の関係式を用いPOP含有量と水温の関数として、POC, PONについては相崎・高村(1986)の分解実験結果を基に関係式を作成し、水温の関数として算定した。分解速度定数の算定結果を表-2に示す。

表-2 算定した分解速度(単位: 1/日)

年/月/日	POC	PON	POP
03/9/2	0.030~0.053	0.046~0.068	0.040~0.063
03/9/19	0.040~0.063	0.056~0.078	0.045~0.064
03/10/20	0.034	0.050	0.043~0.049

2003年9月2日(成層期), 10月20日(混合期)のPONの算定結果を例に図-9に示す。POC, POPの算定結果を含めると、成層期の下層～海底における上層起源割合は $0.02 \sim 8\%$ であり、混合期には $11 \sim 47\%$ と高くなった。10月20日の分解速度は、9月2日と比較すると、上層では低下しているが、下層～海底では増加していることから(水温の分布とはほぼ同様)、混合期に上層起源割合が高くなる理由は、上層における沈降フラックスや沈降速度が増加するためである。この要因として清木ら

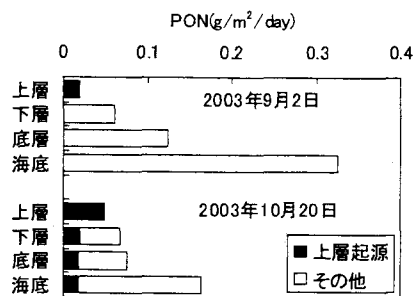


図-9 PON フラックスと上層起源割合

(1985)は、成層の崩壊によって、それまで躍層付近に滞留していた懸濁物質が一気に沈降するものと考察している。このことは、クロロフィル a 濃度が成層期には躍層付近で高く、混合期の10 m 以深では成層期よりも高かったことや、移行期の下層において沈降フラックスや有機物含有量 (POC, PON) が増加していたこととも矛盾しない。また、田多ら (2004) が本調査地点において1年間を通じて底質調査を実施した結果、有機物含有量は9~11月に増加することが確認されている。このため、移行期や混合期には、上層から比較的未分解な有機懸濁物質が海底に供給されることが考えられる。

それでは何故、上層起源物質の沈降量が小さい成層期に、底層、海底でフラックスが大きく、混合期に小さくなるのであろうか。本調査地点における成層期の海底には、高濁度層が形成されており、混合期になると消滅した。この海底高濁度層の変動が底層、海底の沈降フラックスの変動を引き起こすと考えられるため、次にこの変動要因について検討する。

本調査地点における海底濁度は、海底流速の小さい小潮期に高くなる傾向が見られた (図-4)。また、本調査地点における海底流速は平均で1.9 cm/s と非常に小さく、台風14号の接近時でも最大で約10 cm/s 程度であることから、海底高濁度層の形成要因は、波や流れによる底泥の再懸濁とは考えにくい。海底高濁度層内では水温が低くなっていたこと、下層と海底の濁度変動には数日間の遅れがあったことを踏まえ、本調査地点における海底高濁度層の形成について、以下の通り推測した。

小潮期には流れが弱く、浮遊している懸濁物質は海底に沈降し易くなる。流れは弱くても海底付近には乱れが存在するため (鷺見, 1981)、海底に堆積せずに浮遊する。また、高濁度層内では水温が低くなっていたことから、懸濁物質と海水との密度差が小さくなり、沈降速度が低下することも考えられる。小潮期を過ぎると流速が

強くなり、海底付近に浮遊していた懸濁物は巻き上げられて下層付近にまで達する (濁度は小潮期と比較して下層で高く海底で低くなる)。大潮期にはさらに流速が強くなるため、より上方まで巻き上がる (下層と海底の濁度差は小さくなる)。秋季以降になると、鉛直混合によって海底高濁度層は衰退する。

しかしながら、高濁度層が発達する成層期の小潮期に海底付近で水温が低下していることから、低水温で高濁度な水塊の移流や底泥からの湧出等も考えられ、この変動要因についてはさらなる検討を要する。

4. おわりに

本研究をまとめると、以下ようになる。

- 1) 沈降フラックスは、上層で小さく、下層~海底で大きい。混合期は、成層期と比較して上層で大きく、底層、海底で小さくなっていった。
- 2) 有機懸濁物質の分解速度、沈降速度を用いて、下層~海底に存在する上層起源物質割合を算定した結果、成層期には0.02~8%、混合期には11~47%となった。
- 3) 混合期に上層起源割合が高くなる理由は、成層の崩壊による沈降フラックスや沈降速度の増加によると考えられる。この要因としては、成層の崩壊によって、それまで躍層付近に滞留していた懸濁物質が一気に沈降することが考えられる。
- 4) 海底付近の沈降フラックスの変動は、海底高濁度層の変動に左右される。海底高濁度層は、成層期に見られ、小潮期に発達し、大潮期に衰退していた。

参 考 文 献

- 相崎守弘・高村典子 (1985) : 植物プランクトンの分解による栄養塩の回帰, 国立公害研究所研究報告, 第96号, pp. 29-44.
- 朱小華・高杉由夫・橋本英資・安田秀一 (1999) : 広島湾における底層懸濁物質の濃度変動, 沿岸海洋研究, 第37巻, pp. 59-67.
- 鷺見栄一 (1981) : 浅海域の海底境界層と物質の動き, 沿岸海洋研究ノート, 第18巻, pp. 88-99.
- 清木徹・伊達悦二・井澤博文 (1985) : 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, pp. 304-313.
- 田多一史・日比野忠史・松本英雄・村上和男 (2004) : 間隙水の流動に伴う底質の性状変化, 海岸工学論文集, 第59巻, pp. 991-995.
- 谷本辰巳・星加章 (1991) : 江田内湾における海底高濁度層の季節変動, J.Oceanogr. Soc. Japan., Vol. 47, pp. 286-296.
- 谷本辰巳・星加章 (1994) : 大阪湾と江田内湾における懸濁粒子の沈降速度, 海の研究, Vol.3, pp. 13-20.
- 堀江毅・三好英一・関根好幸・宮原裕二 (1986) : 微細有機懸濁物の沈降特性について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 337-341.