

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

高御堂良治¹・永尾謙太郎²・日比野忠史³・松本英雄⁴

沿岸環境を保全するためには一次生産により生成される有機物の沈降・堆積量を明らかにすることが必要である。筆者らは広島湾にセディメントトラップや濁度計を設置することにより有機懸濁物質の沈降特性について調査を行い、現在運用されている自動水質測定装置(海面清掃船)から得られるデータとの関連性について検討した。調査結果より有機懸濁物質の沈降速度には成層の形成状態が大きく影響を与えており、海底堆積泥の性状変化には一次生産起源物質の沈降・堆積が関わっていることが明らかとなった。成層の形成状況と沈降速度の関係をj用いて自動水質測定装置から得られるデータから有機懸濁物質の沈降フラックスを表すことができた。

1. はじめに

広島湾のような閉鎖性の強い海域の海底には有機物を多量に含んだ泥が多く堆積している。このような海底堆積泥は流れなどによって巻き上げられることにより海中に栄養塩を溶出するなど水環境に大きな影響を与えていると考えられている。特に貧酸素水塊の形成や栄養塩の生成に大きく寄与している底泥は、沈降後、数ヶ月から数年かかって分解されることが明らかとなっている(永尾ら, 2005)。そのため、今後、効率的・効果的な自然環境の保全施策を実施するためには、一次生産により生成される有機物の動態を把握する必要がある。しかし、一次生産によって生成された有機物の沈降・堆積に至る過程には、不明な点が多いのが現状である。著者らは、2002 年から広島湾周辺海域において、セディメントトラップを用いた有機物の沈降調査を実施してきた。

本研究では、前述の調査結果に基づき、現在、運用されている船舶による水質調査結果(自動水質測定装置)を活用して、海域における有機物の集積場所および集積量を推定する手法を提案することを行なう。

2. 海面清掃船の概要

広島湾では 2000 年から、広島湾内の浮遊ゴミの回収等を目的として海面清掃船「おんど 2000」(中国地方整備局)が呉湾より出航している。海面清掃船おんど 2000 の船底には自動水質測定装置が設置されており、緯度、経度、海面下約 2 m でのクロロフィル a (Chl-a)、酸化還元電位 (ORP)、pH、塩分、水温等が 4 秒間隔で

測定されている。図-1 は「おんど 2000」の自動水質測定データ(塩分: psu)を航跡に沿って濃淡で表したものである。日によって異なる航路をとるものの、本データを用いることで広島湾全域の水質をおおよそ表すことができる(駒井ら, 2003)。

3. 沈降物捕集筒を用いた現地調査

(1) 調査概要

海中に浮遊する有機懸濁物質の沈降量を把握するため、図-2 に示す ST1 および ST2 において沈降物捕集筒(セディメントトラップ)を設置した。ST1 の水深は 15 m、ST2 の水深は 22 m である。2002 年 8 月～9 月に ST1 および ST2 において、2005 年 6 月～10 月に ST1、2003 年 8 月～10 月に ST2 で調査が行われた。なお、2002 年、2003 年は海面下約 5 m、海底上約 1 m、および海底にセディメントトラップを設置した(佐々倉ら, 2005)。2005 年はセディメントトラップを設置した他、濁度計、DO 計、塩分・水温計 (CT 計) および水温・水深計 (TD 計) を設置した(図-3)。セディメントトラップは約 2 週間毎に回収・再設置を行い、捕集された懸濁物質

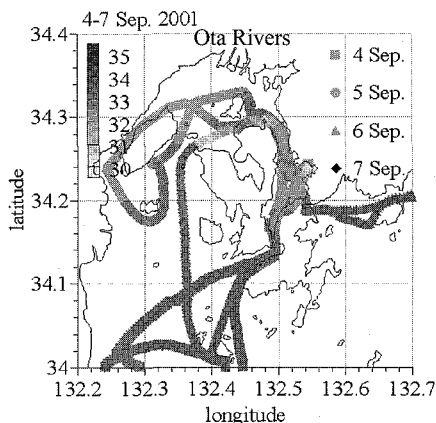


図-1 おんど 2000 により測定された表層塩分分布

1 学生会員 修(工) 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
2 正 会 員 工修 国土環境(株)
3 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
4 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 所長

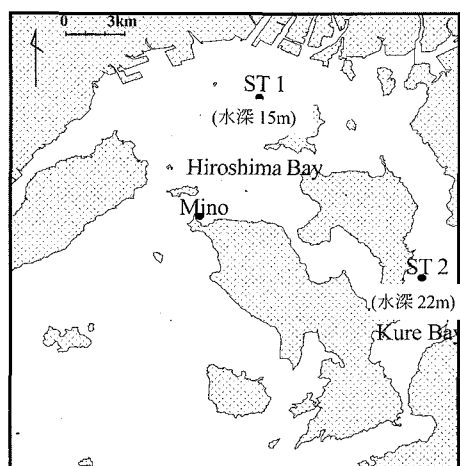


図-2 調査地点

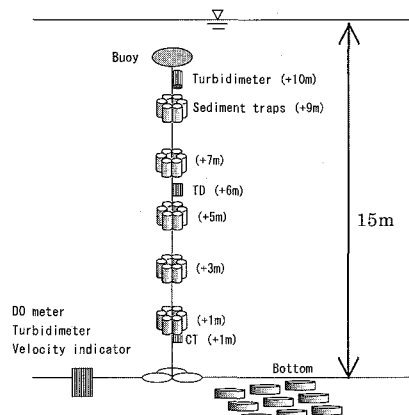


図-3 調査概要 (2005)

についてはSS、粒度分布、Chl-a、フェオフィチン(Phaeo.)の測定を行った。また、セディメントトラップ回収・再設置時にST1, ST2において水温の塩分、濁度、Chl-aの鉛直プロファイルを測定するとともに、海底泥を不攪乱柱状採泥器を用いて採取し、2cm層毎の含水比、強熱減量、粒度分布、Chl-a、Phaeo.等について分析を行った。

(2) 調査結果

図-4には2005年6月6日～10月12日におけるST1での表層および海底の水温、濁度、Chl-aと海底での流速と太田川からの流出量、SS、Chl-a濃度との経時変化とSS、Chl-aプロファイル上に捕集結果から得られたSSとChl-a+Phaeo.のフラックスが示されている。ここで、9月5日～15日までは台風の接近により、上層の濁度計およびセディメントトラップは回収したため欠測となっている。

a) 流況調査結果

2005年の調査では、水温は6月6日の時点で既に上

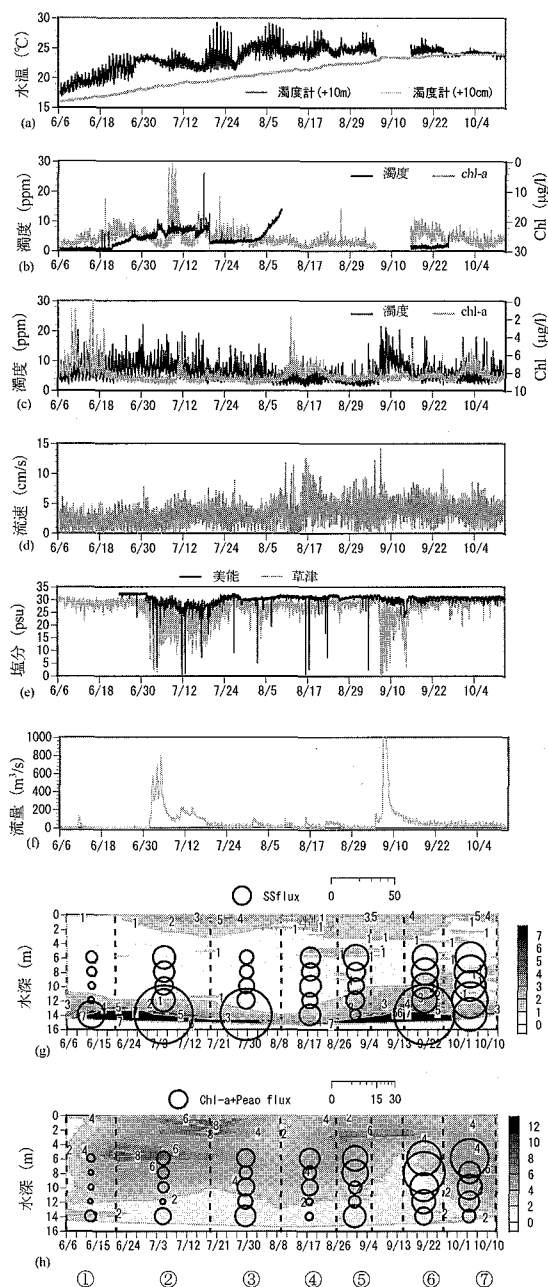


図-4 調査期間の水質、SS、Chl fluxの経時変化

(a): 上層および下層水温, (b): 上層濁度とChl-a濃度, (c): 下層濁度とChl-a濃度, (d): 海底流速, (e): 美能および草津における表層塩分, (f): 河川流量, (g): 濁度の鉛直測定結果とセディメントトラップにより測定されたSS flux, (h): Chl-a濃度の鉛直測定結果とセディメントトラップにより測定されたChl-aとPhaeo.のflux (g), (h)中の点線は水質測定日およびセディメントトラップ回収・再設置日, 丸番号はセディメントトラップ設置期間を, 図中の円は各フラックスの大きさを表している)

層と下層の間に2℃程度の水温差がある。下層の水温は9月まで上昇し続けているが、上層との水温差は6月下旬まで大きくなり続け、7月に水温差は小さくなるものの、8月初めには再び水温差が大きくなっている。9月に向かって水温差が小さくなり、9月25日頃には上層と下層の水温差はなくなっている。

太田川において大規模な出水がある期間に(図-4(f)), 草津(太田川放水路河口), 美能(太田川河口南沖約10 km)における塩分が低下していることがわかる(図-4(e)). 特に流量が継続的に大きくなっている7月中旬までの約半月間では、草津、美能での塩分ともに約1ヶ月程度低下した状態が続いている。また、9月の台風通過時にも大規模な出水があり、この時も出水後、約20日程度は草津において塩分の低下が見られる。しかし、7月の出水時に比較して美能での塩分の低下量は小さく、7月と流れ場が変化していることが推測できる。広島湾奥域での流れ場は季節的に変動しているが、夏期においては太田川河口域では大規模な出水が起ると、流入した淡水はすぐには拡散せず、ある程度の期間は河口域付近に滞留していると考えられる。また、河口域に河川水が滞留することによってST1の表層において密度が低下する(図-9(a))ことも、密度成層の形成を促進する要因と考えられる。

ST2においては7月の出水時には表層密度の低下が見られるものの、9月の台風時の出水では表層密度の低下は見られない(図-9(b))。このことから、9月においては河川から流入した淡水は、広島湾東部の呉湾方面には拡がらず、西部の宮島方面に拡がってゆくものと推察できる。

b) 河川出水と Chl-a・濁度変化

上層において7月初旬に河川からの大規模な出水により7月10日頃に顕著な Chl-a の増大がある。この変動は海底においても現れており、数日の遅れで上層において生成された Chl-a が海底に達していると推定できる。ただし、他の期間において海底での Chl-a の値は上層での値と対応しておらず、海底での Chl-a が常に上層から供給されているわけではないことがわかる。海底での濁度の最大値は20 ppm 程度であり、2003年度の呉湾(ST2)での数分の1程度でしかない(日比野ら, 2005)。また、濁度の上昇は2003年のST2での観測と同様に流速に対応していない。台風が通過した9月10日前後においても10 ppm 以上の濁度が10日程度続いているが、濁度が大きくなっている期間を通して海底付近で大きな流速は生じていない。

c) Chl-a・濁度の鉛直分布とトラップ捕集量

図-4(b)に示された底層濁度は、海底で連続計測された濁度とよく対応しており、図-4(g)に示した濁度分布

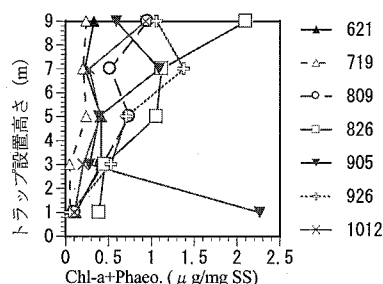


図-5 トラップ捕集物中の Chl-a, Phaeo. 含有量

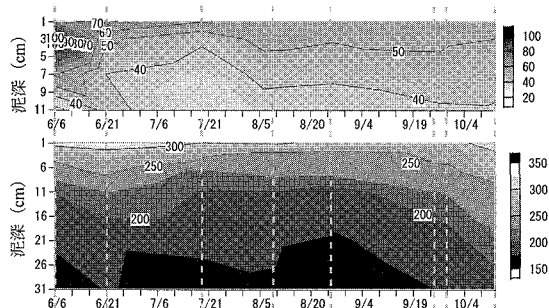


図-6 底質性状の経時変化(上: Chl-a+Phaeo. 含有量(μg/g), 下: 含水比(%))破線は底泥採取日を示す

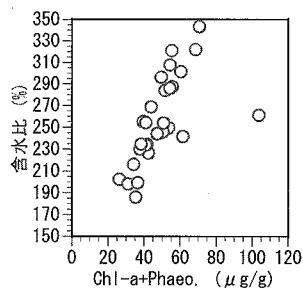


図-7 含水比と Chl-a, Phaeo. 含有量の関係

が本観測期間の濁度の変化を概ね表していると言える。図-4(g), (h)から海底でトラップされるセジメントは海底での濁度の増大とともにフラックスが大きくなっており、海底で捕捉されるセジメントが底層で形成される濁度層起源であることがわかる。さらに、海底付近のセディメントトラップ中には9月と6月を除いて Chl-a や Phaeo. の含有量が少ない(図-5)ことから、海底で形成された濁質が多く捕集されていることがわかる。

d) 底泥性状の変化

図-6には調査期間中の底泥の2 cm 毎に計測された0~32 cm 層の含水比および0~12 cm 層の Chl-a+Phaeo. の含有量が示されている。図中の破線は底泥の採取日を表している。6月と10月に含水比が高く、含水量に対応して Chl-a 量も多くなっている。両

者の相関関係を図-7に示した。Chl-aとPhaeo.を多く含む泥は含水比が高くなる傾向にあるが、Chl-a, Phaeo.ともに植物プランクトン起源の物質であることから、上層からの一次生産起源物質が沈降し、底泥間隙水の流動が大きい時期（日比野ら, 2005）に底泥内へ輸送されていると考えることができる。

e) 有機懸濁物質の沈降特性

図-4(h)に示した期間②では約15日間にわたって河川流量が増加し、太田川河口では低塩分水塊が滞留し、表層のChl-a量も大きくなっている。しかし、セジメントトラップに捕集されたChl-a量は期間⑤以降に比較して少なくなっており、海底でのChl-aも小さくなっている（図-4(c)）。期間①, ②では海底でSS捕集量が大きく、Chl-a量が小さいのに対し、期間⑥, ⑦では逆の捕集量になっている。さらに、SS, Chl-a捕集量とも期間⑥, ⑦で海中の濁質、Chl-aが期間①, ②に比較して多量に存在しているわけではないことがわかる。これらのことは成層期においてはChl-aを含む濁質の沈降速度が小さく、有機泥の沈降が成層状態と関連していることを示している。

4. 有機懸濁物質沈降速度の推定

有機懸濁物質の海底への沈降・堆積量を把握するため

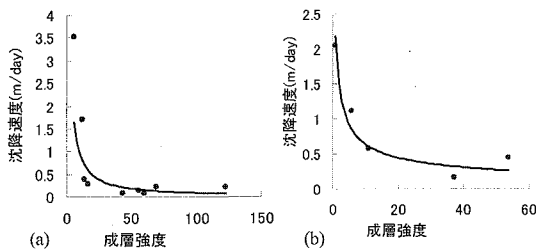


図-8 成層強度と沈降速度の関係

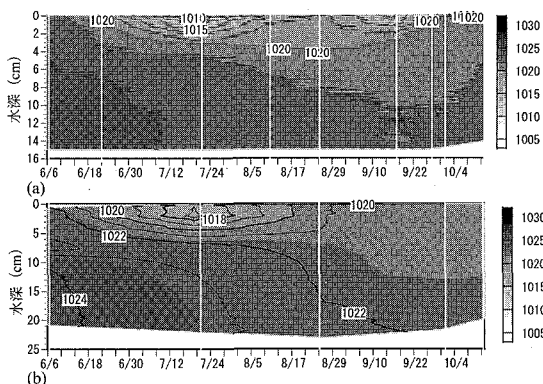


図-9 2005年海水密度の鉛直分布 (a): ST1, (b): ST2
図中の線は測定日を示す

に、有機懸濁物質の沈降速度を推定する。有機懸濁物質の沈降速度は外力の有無、粒径、土粒子の密度といった物理的要因の他、海水中的濁質濃度、海水塩分、水温、有機物含有量などの化学的要因によっても変化するため、その各要因に対する沈降速度の応答を正確に把握することは困難である。そのため、本研究ではセジメントの捕集量から簡易的に沈降速度を算出した。

有機懸濁物質が粒度分布を持たず、鉛直速度と沈降速度の和を懸濁物質の見かけの沈降速度 w とし、海水中的有機懸濁物質濃度、粒度分布が捕集期間中において一様であることを仮定すると、沈降速度は、周辺海水中的有機懸濁物質濃度 C_0 と沈降フラックス F を用いて、次式で表される。

$$w = F/C_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

実際には有機懸濁物質は粒度分布を持ち、その濃度も時間的に変化しているが、本観測ではセジメント回収時の濁度を線形補完した値が連続計測された濁度とよく対応していた（図-4(h), (g)）こと、季節的な有機懸濁物質の沈降・堆積量の変化を把握することを目的としていることから、上式による沈降速度を採用した。

図-8は2002年度～2005年度の現地調査結果を用いて算出した沈降速度と成層強度との関係を示したものである。成層強度は水柱を一様な状態にするために要する単位体積当たりのエネルギーであり、以下の式で与えられる。

$$\phi = \frac{1}{H} \int (\rho(z) - \bar{\rho}) g z dz \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで ϕ は成層強度、 H は水深、 ρ は海水密度、 g は重力加速度 z は水深である。沈降速度は季節的に変動しており、図-8に示すように成層強度と一意的な関係にあり、それらの関係は、次の式で表される。

$$w = a \cdot \phi^b \quad \dots\dots\dots (3)$$

図-9にはST1, ST2における海水密度の経時変化を示している。ST1, ST2における海水密度の鉛直分布（図-5）では、河口域であるST1ではST2よりも表層において密度が低く、異なる密度分布を有している。沈降速度は成層強度のみの関数として表す必然性はない。さらに、上述のように鉛直速度と沈降速度の和を w として用いていることから、ST1とST2では(3)式の係数 a と b は異なった値となる。ST1, ST2での沈降速度と成層強度の関係は流れ場の特性を係数に含めて表すと次式のようになる。

$$w_{ST1} = 10.42 \cdot \phi_{ST1}^{-1.03} \quad \dots\dots\dots (3a)$$

$$w_{ST2} = 2.62 \cdot \phi_{ST2}^{-0.55} \quad \dots\dots\dots (3b)$$

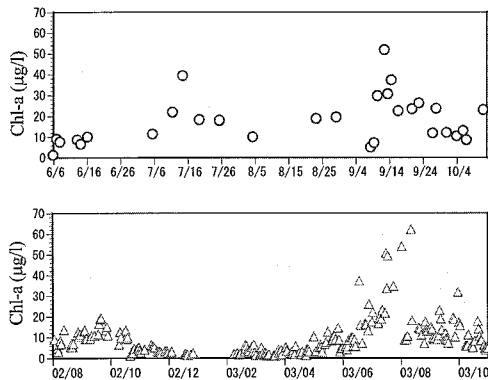


図-10 自動水質測定装置により測定された Chl-a 濃度の経時変化

上: ST1 (2005/6/6~2005/10/12)
下: ST2 (2002/8/1~2003/10/31)

5. 自動水質測定装置から得られるデータと有機懸濁物質沈降量の関係

本章では現地調査結果と海面清掃船に設置された自動水質測定装置により得られるデータを比較し、海底への沈降量を簡易的に表す手法について検討を行った。

自動水質測定装置から得られた、2005年6月~10月までのST1付近における表層 Chl-a 濃度を図-10に示した。ST1の上層で測定された値(図-4(b))と比較すると、「おんど2000」がST1付近を通過する頻度は少ないためデータ数が少ないものの、Chl-a 濃度変動の傾向はよく表せている。

自動水質測定装置で測定されている Chl-a データを線形補完し、Chl-a 濃度積算値と沈降速度 w との積をとり、Chl-a のフラックスを算出した結果、現地調査から測定された海面上層での値とよく一致した(図-11)。ここで、現地調査による沈降フラックスは、Chl-a とその分解生成物である Phaeo. も含めて算出している。

本研究では沈降フラックスは一次生産起源の植物プランクトン(海域表層での Chl-a 量)を対象としていることから、一次生産起源による有機懸濁物質の沈降に関しては成層の形成状況が大きく関わっていると考えられる。成層が発達している夏期においては有機懸濁物質の沈降速度は抑制され、成層が崩壊することで沈降が促進されることがわかる(清木ら, 1985)。その要因として、一次生産起源の有機懸濁物質には植物プランクトン等の有機物が多量に付着しており、これが懸濁物質の密度を低下させるため、懸濁物質の挙動が海水密度の変化に対して影響を受けやすくなると考えられる。

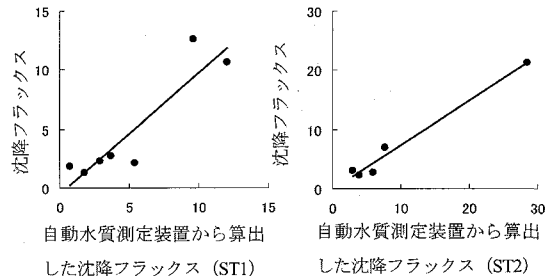


図-11 自動水質測定装置のデータより求められた沈降フラックス (Chl-a 積分値 $\times w$) と現地調査により測定された沈降フラックスの比較

6. おわりに

本研究をまとめると、以下のようになる

- (1) 海底泥の性状変化には一次生産起源による有機懸濁物質の沈降・堆積が影響を与えており、一次生産起源の沈降・堆積量が増加すると底泥含水比が増大する。
- (2) 一次生産起源による有機懸濁物質の沈降は成層の有無に影響され、成層が発達している夏期においては沈降が抑制される。その原因としては沈降粒子中の有機物含有量の増大による粒子の密度低下などが挙げられる。
- (3) 有機懸濁物質の沈降速度は成層強度を用いて指数関数 $w = a\phi^b$ により表すことができた。係数 a, b の値はその地点の密度場の特性などにより決定される。
- (4) 自動水質測定装置から得られたデータと成層強度を用いて表される沈降速度との積をとることで有機懸濁物質の沈降フラックスとして見積もることができた。

参考文献

- 駒井克昭・日比野忠史・松本英雄(2003): 広島湾における季節的な流動外力の特性, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 426-430.
- 佐々倉諭・日比野忠史・高御堂良治・村上和男・松本英雄(2005): 広島湾における有機懸濁物質の沈降特性, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 911-915.
- 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.
- 永尾謙太郎・日比野忠史・松本英雄(2005): 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, pp. 916-920.
- 日比野忠史・村上和男・松本英雄(2005): 底泥内での間隙水の動きと浮泥層の形成機構, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 961-965.