

安定同位体比およびC/N比から評価した 小浜湾における堆積有機物の起源

佐藤専寿^{1†}, 杉本 亮², 富永 修²

Source of sedimentary organic matter in Obama Bay estimated from stable isotope and C/N ratios

Takahisa SATO^{1†}, Ryo SUGIMOTO² and Osamu TOMINAGA²

The total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), C/N ratio and carbon and nitrogen stable isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of sedimentary organic matter (SOM) were measured to estimate the amount and source of surface SOM in Obama Bay, the central coast of Wakasa Bay. The concentration of TOC and TN of surface SOM in Obama Bay were 1.5–32.7 mg C·g⁻¹ and 0.2–2.4 mg N·g⁻¹, respectively. Spatial variations of TOC and TN in sediments were low in the western area. In contrast, they were higher in eastern area and dramatically increased at the mouth of the Kita and Minami rivers. These maximum values of TOC and TN were similar to those of Osaka Bay which is known as a eutrophic sea area. The $\delta^{13}\text{C}$ values and C/N ratio varied between -21.1‰ and -28.7‰, and 6.5 and 17.9 respectively. Judging from the $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratio, the major origin of SOM in the western area was marine organic matter (mainly marine phytoplankton), whereas the major source of SOM in the eastern area was terrestrial organic matter (mainly terrestrial plants). These results are possibly related to the location of two main rivers, low flocculation in the estuaries and counterclock-wise current in Obama Bay.

Key words: SOM, terrestrial plants, carbon stable isotope ratio, C/N ratio

はじめに

全海洋の10%程度を占める河口沿岸域は、河川から豊富な栄養塩類が常に供給されているため (Rivera-Monroy et al., 1998), 外洋域と比較して高い生産性を持っている (Walsh, 1991)。また、河川からはこれら栄養塩類とともに陸域起源有機物も沿岸域へと供給されている (Harmelin-Vivien et al., 2010)。陸域起源有機物には、陸上高等植物や藻類、菌類、微生物そして動物など、陸域で生産された有機物が含まれる (Benner, 2004)。その中でも、陸上高等植物により生産される有機物は年間生産量1000億t以上と推定されており、地球上で最も多量に再生産される生物資源

として知られている (磯貝, 2003)。しかし、陸上高等植物は、窒素含量が非常に低く、またリグニンやセルロースなどの難分解性有機物を多く含むため (磯貝, 2003)、餌料源として多くの海洋生物にとって利用しにくく、沿岸海洋食物網に組み込まれにくい物質であるものと考えられてきた。このような理由から、一般に沿岸海洋食物網は、植物プランクトンや底生微細藻類によって支えられているという研究例がきわめて多い (Riera et al., 1999; Kang et al., 2003; Yokoyama and Ishihi, 2003; Yokoyama et al., 2005)。しかしながら、近年二枚貝や多毛類など一部の底生無脊椎動物が陸上高等植物を餌料源として利用している可能性が報告されつつある (Kikuchi and Wada, 1996; Kasai and Nakata, 2005; Attrill et al., 2009; McLeod and Wing, 2009; Ito et al., 2011)。さらに、河口沿岸域に生息する異体類やハゼ科の一部は多毛類食性が強く (Darnaude, 2005; 富永・牧田, 2008)、上位の栄養段階まで陸域起源有機物が寄与していることが予想される。そのため、河川より供給され河口沿岸域に堆積する陸上高等植物の動態を把握することは、河口沿岸域における生物資源の動態を評価するうえで重要な

2012年7月6日受付, 2012年10月25日受理

¹ 福井県立大学大学院生物資源学研究所

² 福井県立大学海洋生物資源学部

¹ Graduate School of Biosciences and Biotechnology, Fukui Prefectural University, 49-8-2 Katsumi, Obama, Fukui 917-0116, Japan

² Research Center for Marine Bioresources, Faculty of Marine Biosciences, Fukui Prefectural University, 49-8-2 Katsumi, Obama, Fukui 917-0116, Japan

† E-mail: s0994002@fpu.ac.jp

要素の一つとなる。

海域の堆積有機物中に含まれる陸上高等植物の割合を評価する手法として、生元素の安定同位体比や元素比の違いを利用した分析が幅広く用いられている (Peters et al., 1978; Andrews et al., 1998; Mishima et al., 1999; Hu et al., 2006; Usui et al., 2006). 一般にC₃陸上高等植物の炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は-27‰程度であるのに対し、温帯域の海洋植物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ は-22‰から-18‰程度の値を示す (Fry and Sherr, 1984; 和田, 1986). また、前者の窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) は0‰程度、後者はそれよりも高い値を示すことが多い (Peterson and Fry, 1987). さらに、陸上高等植物と植物プランクトンでは細胞中の有機炭素と窒素の比 (C/N) も大きく異なり、C₃陸上高等植物のC/Nは20以上、海洋植物プランクトンは5-10程度の値を示す (Parsons et al., 1961; Hedges et al., 1986). このような生産者間での安定同位体比や元素比の違いを相補的に利用することで、河口沿岸域に堆積する有機物の起源を評価することが可能となる。

本研究の対象海域である小浜湾は、若狭湾の枝湾で、東西17 km、南北6 km、湾口幅2.4 km、面積58.7 km²の半閉鎖的内湾である (Fig. 1). 湾内には湾口西側から若狭湾由来の外海水が流入し、湾内を反時計回りに流れた後、湾口東側から若狭湾へと流出する還流が小浜湾の主要な流れと考えられている (磯部・相原, 1976). また、小浜湾内への淡水供給は、一級河川の北川 (流域面積212 km²) と二級河川の南川 (流域面積211 km²) からのものがほとんどであり、その流入場所も同一の湾奥部となっている。北川と南川の流路延長は30 km程度と短く、集水域の多くを森林が占める非常に急峻な河川である。また、両河川ともに水深が浅く、北川では河口から約3.5 km、南川では河口か

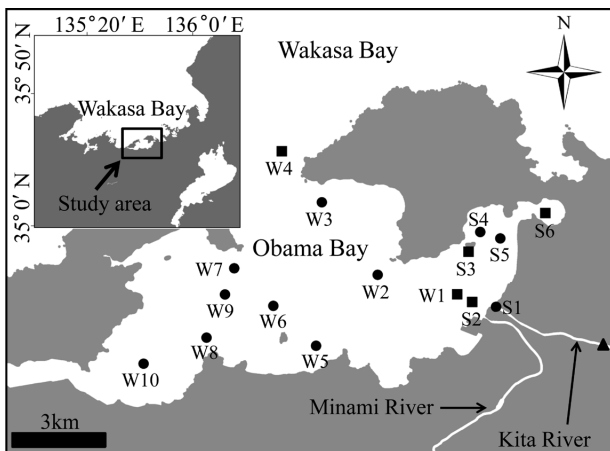


Figure 1. Sampling sites of sedimentary organic matter (SOM) (circles and squares), particulate organic matter (POM) (squares) in Obama Bay and Takatsuka Observatory (triangle) in Kita River.

ら約1.5 kmの位置に堰堤が存在しているため、河川内への塩水進入の影響も小さい。一般に、河川の感潮水域では、懸濁物粒子の凝集・沈降が起こりやすいことが知られている (奥田, 1996). それゆえ、河口域での凝集作用の影響も小さいことが考えられ、湾内へ供給される陸上高等植物の量は大きいことが予想される。そこで本研究では、河口沿岸域の食物網における陸起源有機物の重要性を評価するための基礎的知見として、小浜湾内に堆積している有機物 (SOM) を季節ごとに広範囲に採取し、その安定同位体比および元素比から湾内に堆積している有機物の起源の推定、およびSOMに含まれる陸上高等植物の割合を評価することを目的とした。

材料と方法

標本採集

調査は、若潮丸 (福井県水産試験場所属) およびセリオラ (福井県立大学所有) を用いて2007年5, 8, 11月および2008年2月に行った。調査地点は、小浜湾内全体を網羅できるように10定点 (W1-W10) を設けた (Fig. 1). 2007年8月以降は、河川水の影響が強い湾東部において新たに6定点 (S1-S6) を追加し、計16定点とした (Fig. 1). 各定点において、エクマンバージ型採泥器またはスミスマッキンタイア型採泥器を用いて採泥し、表層1 cmを堆積有機物 (SOM) 試料とした。W1, W4, S2, S3およびS6地点からは懸濁態有機物 (POM) 試料を得るため、表層水の採水を行った。各測点の表層0.1 mの塩分は多項目水質計 (YSI 6600 Sonde, YSI ナノテック) を用いて測定した。また、C₃陸上高等植物の同位体比代表値を把握するために、北川の川底に堆積していた落ち葉を採取した。

北川の流量データとして、国土交通省水門水質データベースの高塚観測所で測定された2007年4月1日から2008年3月31日までのデータを使用した。調査期間における流量は0.6-92.3 m³ s⁻¹で変化し、平均流量は11.1 m³ s⁻¹であった。また、調査前には大きな出水は見られなかった (Fig. 2).

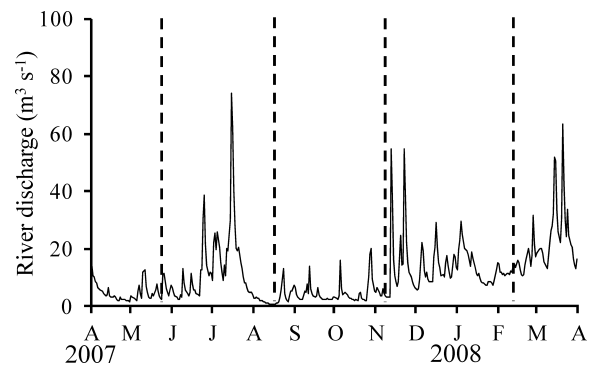


Figure 2. River discharge of Kita River from April 2007 to April 2008. Dotted lines indicate sampling dates.

Table 1. Carbon stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$), nitrogen stable isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) and C/N atomic ratios (C/N) of marine particulate organic matter in Obama Bay in May, August, November 2007 and February 2008.

Station	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)				$\delta^{15}\text{N}$ (‰)				C/N			
	May	Aug.	Nov.	Feb.	May	Aug.	Nov.	Feb.	May	Aug.	Nov.	Feb.
W1	-22.8	-21.8	-23.9	-27.9	5.0	6.3	5.2	3.5	7.7	6.3	7.1	8.5
W4	-22.3	-22.3	-24.7	-26.3	6.2	6.3	5.2	3.8	7.3	7.4	7.9	7.1
S2	ND	-21.9	-28.3	-28.0	ND	5.2	2.9	2.0	ND	6.7	8.8	7.7
S3	ND	-21.8	-28.0	-29.0	ND	5.5	3.1	2.8	ND	6.7	8.0	8.3
S6	ND	-20.4	-28.0	-28.3	ND	6.0	3.5	1.9	ND	7.4	8.6	7.8

ND: no data

化学分析

採水試料は100 μm のナイロン網を用いて動物プランクトンなどを取り除いた後、あらかじめ450度で2時間燃焼して有機物を除去したGF/Fフィルター (Whatman) を用いて吸引ろ過を行い、フィルター上に集められた粒子をPOMとした。SOM試料において、W4は有機物量が少なかったため、泥を蒸留水で懸濁させ、上澄み液をGF/Fフィルター (Whatman) を用いて吸引濾過を行い、フィルター上の粒子をSOMとした。そのため、SOMに含まれる有機炭素および窒素の濃度は得られなかった。POM試料は、デシケーター内に試料と濃塩酸を入れ、濃塩酸から生じた蒸気により炭酸カルシウムを除去した。SOM試料は、遠沈管にSOM試料および1N塩酸を加え、一晚浸透させることにより炭酸カルシウムを除去した。落ち葉は60°Cの恒温オープンで乾燥させた後、乳棒と乳鉢を用いて粉末サンプルとした。POM、SOMおよび落ち葉に含まれる有機炭素 (TOC) と窒素 (TN) の濃度ならびにその $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ は、元素分析計 (Carlo Erba, EA1108) に接続した質量分析計 (Finnigan Mat, delta S) により測定した。 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ は、(1) に従い標準試料からの相対千分率で表示した。

$$\delta^{13}\text{C} \text{ or } \delta^{15}\text{N} = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

R_{sample} は $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ あるいは $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ である。標準試料は、 $\delta^{13}\text{C}$ はPDB (Pee Dee層産矢じり石)、 $\delta^{15}\text{N}$ は大気窒素である。

結果

POMの $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ およびC/N比

調査期間中、小浜湾内の表層POMの $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ はそれぞれ-29.0‰から-20.4‰および1.9‰から6.3‰を示した (Table 1)。季節による違いを見ると、 $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ ともに夏季に高い値を示し ($\delta^{13}\text{C}$ =-22.3‰から-20.4‰、 $\delta^{15}\text{N}$ =5.2‰から6.3‰)、秋季と冬季にはその値はともに低い傾向にあった ($\delta^{13}\text{C}$ =-29.0‰から-23.9‰、 $\delta^{15}\text{N}$ =1.9‰から5.2‰)。一方、C/N比は $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ほど明瞭でないが、夏

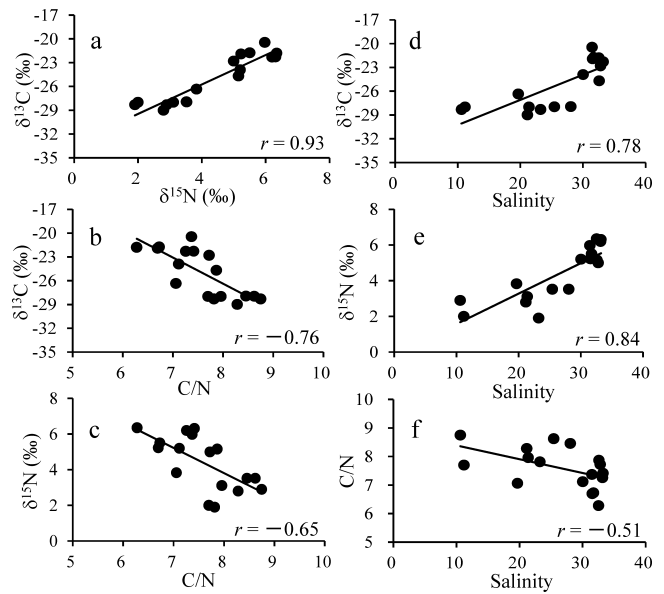


Figure 3. Relationships between (a) carbon stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen stable isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$), (b) $\delta^{13}\text{C}$ and C/N atomic ratios (C/N), (c) $\delta^{15}\text{N}$ and C/N, (d) $\delta^{13}\text{C}$ and salinity, (e) $\delta^{15}\text{N}$ and salinity, (f) C/N and salinity of POM. Data of different four months were included.

季に低く (6.3–7.4)、秋季と冬季にやや高くなる傾向が見られた (7.1–8.8)。

調査期間中のPOMの安定同位体比と元素比には以下のような明瞭な関係性があった。 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ は高い正の相関関係 ($r=0.93$, $P<0.001$, $n=17$, Fig. 3a), $\delta^{13}\text{C}$ とC/N比には高い負の相関関係 ($r=-0.76$, $P<0.001$, $n=17$, Fig. 3b), $\delta^{15}\text{N}$ とC/N比には負の相関関係 ($r=-0.65$, $P<0.05$, $n=17$, Fig. 3c) が認められた。また塩分との関係を見ると、 $\delta^{13}\text{C}$ ($r=0.78$, $P<0.001$, $n=17$, Fig. 3d) および $\delta^{15}\text{N}$ ($r=0.84$, $P<0.001$, $n=17$, Fig. 3e) はそれぞれ高い正の相関が認められ、C/N比には負の相関 ($r=-0.51$, $P<0.05$, $n=17$, Fig. 3f) が認められた。

Table 2. Concentration of the total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) of the sediments at each station in Obama Bay in May, August, November 2007 and February 2008.

Station	TOC (mg C·g ⁻¹)				TN (mg N·g ⁻¹)			
	May	Aug.	Nov.	Feb.	May	Aug.	Nov.	Feb.
W1	32.7	16.0	12.9	6.3	2.4	1.0	1.0	0.7
W2	25.0	21.9	25.2	19.9	2.1	1.8	2.1	1.8
W3	20.1	15.0	18.5	16.9	2.1	1.5	2.0	1.8
W4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W5	6.0	1.5	1.5	1.5	0.8	0.2	0.2	0.2
W6	18.2	14.5	13.8	ND	1.7	1.2	1.3	ND
W7	17.3	11.0	10.8	7.7	1.9	1.2	1.3	0.9
W8	15.4	13.6	14.1	13.7	1.6	1.4	1.5	1.6
W9	18.3	16.2	16.5	16.7	1.9	1.6	1.8	1.9
W10	16.8	15.0	17.6	16.4	1.8	1.5	1.9	1.8
S1	ND	8.2	2.1	5.3	ND	0.8	0.2	0.6
S2	ND	3.3	1.9	2.5	ND	0.4	0.3	0.5
S3	ND	19.9	20.0	18.7	ND	1.8	1.8	1.8
S4	ND	19.9	17.2	18.2	ND	2.1	1.5	1.8
S5	ND	18.6	18.9	17.9	ND	1.9	1.9	1.9
S6	ND	ND	18.6	19.1	ND	ND	2.1	2.2

ND: no data

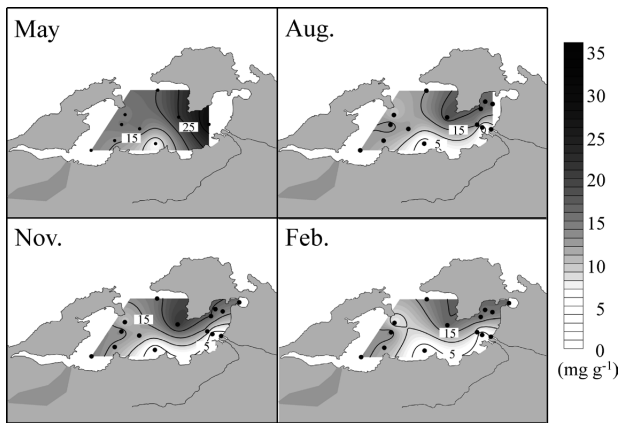


Figure 4. Horizontal distributions of total organic carbon (TOC) in Obama Bay in May, August, November 2007 and February 2008.

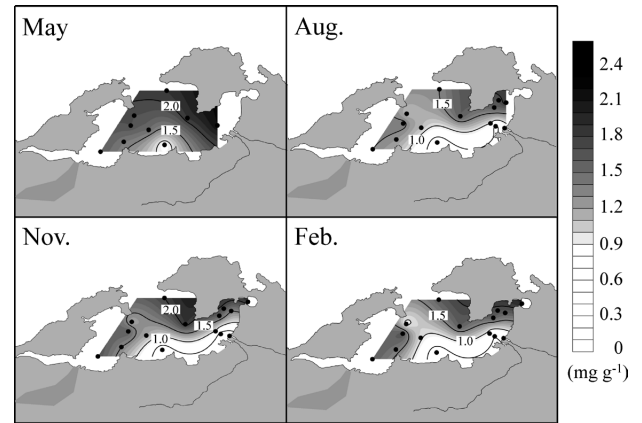


Figure 5. Horizontal distributions of total nitrogen (TN) in Obama Bay in May, August, November 2007 and February 2008.

SOMのTOC, TN濃度

調査期間中, SOM中のTOCおよびTNはそれぞれ1.5–32.7 mg C·g⁻¹, 0.2–2.4 mg N·g⁻¹の間で変化した (Table 2). 空間分布を見ると, 湾西部 (W5, W6, W7, W8, W9, W10) のTOCおよびTN濃度は1.5–18.3 mg C·g⁻¹および0.2–1.9 mg N·g⁻¹である一方, 湾東部 (S3, S4, S5, S6, W1, W2, W3) では6.3–32.7 mg C·g⁻¹および1.0–2.4 mg N·g⁻¹と湾西部に比べて高い値を示した (Table 2, Figs. 4, 5). また, W1では, 冬季に最も低い値 (6.3 mg C·g⁻¹, 0.7 mg N·g⁻¹)

を, 春季に最も高い値 (32.7 mg C·g⁻¹, 2.4 mg N·g⁻¹) を示した. 一方S2およびW5では, 調査期間を通して湾内で最も低い値を示した (1.5–6.0 mg C·g⁻¹, 0.2–0.8 mg N·g⁻¹). このような空間変化は季節を通して同様に見られた.

SOMのδ¹³C, δ¹⁵NおよびC/N比

本研究で採取されたSOMのδ¹³Cとδ¹⁵Nは, -28.7‰から-21.1‰および-1.1‰から6.7‰の間で変化した (Table 3). 調査期間を通してW1では, δ¹³Cおよびδ¹⁵Nともに低い値が認められ (δ¹³C=-28.7‰から-26.1‰, δ¹⁵N=1.5‰から

Table 3. Carbon stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$), nitrogen stable isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) and C/N atomic ratios (C/N) of sedimentary organic matter at each station in Obama Bay in May, August, November 2007 and February 2008.

Station	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)				$\delta^{15}\text{N}$ (‰)				C/N			
	May	Aug.	Nov.	Feb.	May	Aug.	Nov.	Feb.	May	Aug.	Nov.	Feb.
W1	-27.0	-27.0	-28.7	-26.1	2.0	1.5	1.6	2.1	16.0	17.9	15.4	12.7
W2	-25.2	-25.2	-25.7	-25.5	3.3	3.3	3.0	3.3	13.8	14.1	13.7	12.6
W3	-23.3	-23.1	-23.5	-23.3	4.6	4.4	4.5	4.3	11.2	11.6	11.0	11.2
W4	ND	-24.4	-25.6	-25.5	ND	5.2	5.4	6.7	ND	9.9	9.5	8.6
W5	-21.4	-21.7	-23.4	-23.6	4.9	5.3	3.2	3.3	9.2	8.7	7.5	8.0
W6	-23.3	-23.5	-23.9	-23.0	4.5	4.5	4.4	4.6	12.3	13.6	12.6	ND
W7	-21.1	-21.4	-21.7	-21.8	5.0	5.2	5.0	5.5	10.7	10.8	10.0	10.0
W8	-22.7	-22.4	-22.8	-22.7	4.6	4.9	4.8	4.7	11.1	11.3	10.8	10.3
W9	-22.5	-22.4	-22.9	-22.5	5.1	4.9	4.7	4.7	11.2	11.8	10.8	10.4
W10	-23.0	-22.9	-23.2	-24.5	4.6	4.7	4.5	4.3	11.2	12.0	10.9	10.6
S1	ND	-26.5	-26.1	-24.7	ND	2.6	-1.1	2.2	ND	11.5	9.8	6.5
S2	ND	-25.7	-26.0	-25.8	ND	1.9	0.9	2.5	ND	8.8	7.3	9.8
S3	ND	-25.4	-26.5	-25.1	ND	3.1	3.0	3.4	ND	12.6	13.2	11.9
S4	ND	-24.1	-25.8	-24.4	ND	4.0	3.4	3.9	ND	11.0	12.9	11.9
S5	ND	-24.3	-26.0	-22.6	ND	3.6	3.4	4.2	ND	11.4	11.5	10.1
S6	ND	ND	-24.5	-24.3	ND	ND	4.1	3.6	ND	ND	10.5	11.1

ND: no data

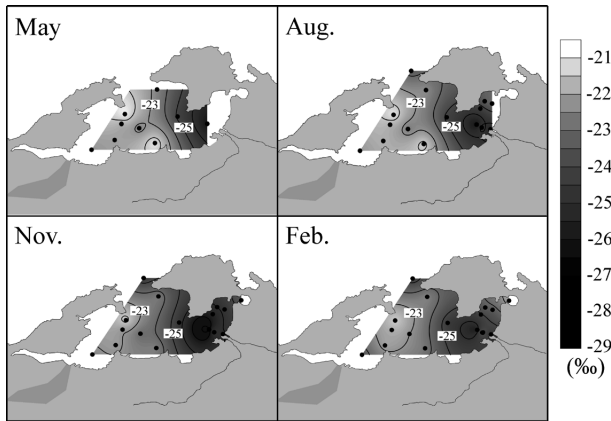


Figure 6. Horizontal distributions of carbon stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) of sedimentary organic matter in Obama Bay in May, August, November 2007 and February 2008.

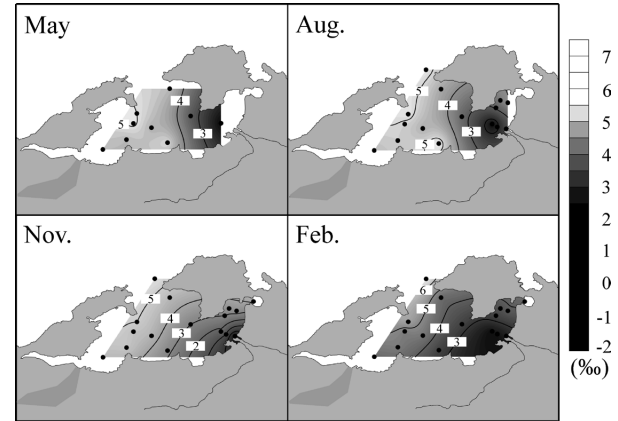


Figure 7. Horizontal distributions of nitrogen stable isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) of sedimentary organic matter in Obama Bay in May, August, November 2007 and February 2008.

2.1‰), その後は河口から離れるにつれて, 値が増加する傾向が認められた (Figs. 6, 7). またC/N比も, W1で最も高い値 (12.7–17.9) を示し, その他の測点では低下する傾向にあった (Fig. 8). このような空間変化は, 季節を通して同様に認められた. 実際, 河口からの距離に対して, $\delta^{13}\text{C}$ ($r=0.69, P<0.001, n=56$; Fig. 9a) と $\delta^{15}\text{N}$ ($r=0.80, P<0.0001, n=56$; Fig. 9b) には明瞭な相関関係が認められた. しかしながら, C/N比と河口からの距離には相関が認められなかった ($r=-0.17, P>0.05, n=55$).

考察

POMの組成

小浜湾内の表層水中のPOMの $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ はそれぞれ-29.0‰から-20.4‰, 1.9‰から6.3‰の範囲で変動していた. それらの値は夏季に高く, 冬季に低いという明瞭な季節性を示した. 一般に, C_3 陸上高等植物の $\delta^{13}\text{C}$ は約-27‰, 中緯度海域における海洋植物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ 値は約-20‰を示すことが知られている (和田, 1986). これらのことから, 夏季の高い $\delta^{13}\text{C}$ は海洋植物プランクトンが, 冬季の低い $\delta^{13}\text{C}$ は C_3 陸上高等植物が優占していることを

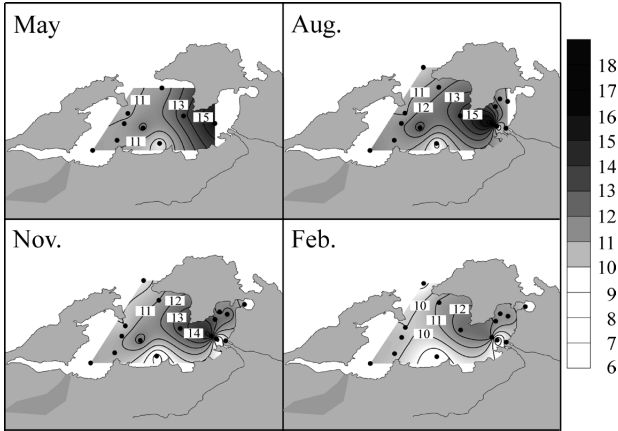


Figure 8. Horizontal distributions of C/N atomic ratios (C/N) of sedimentary organic matter in Obama Bay in May, August, November 2007 and February 2008.

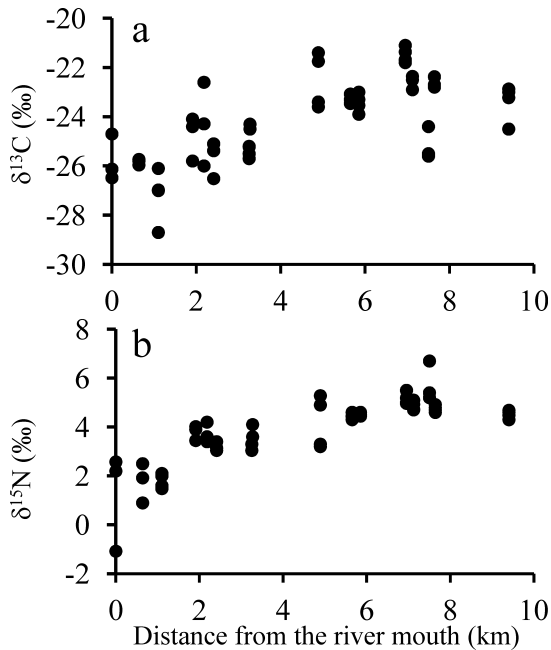


Figure 9. Spatial variations of (a) carbon stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) and (b) nitrogen stable isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$).

示唆する。しかしながら、実測されたPOMのC/N比は6.3–8.8の間で変化し、 C_3 陸上高等植物のC/N比 (>20, Hedges et al., 1986) に比べると明らかに低く、むしろC/N比の低い植物プランクトンの値 (5–10, Parsons et al., 1961) に近い。河川内で生産された植物プランクトンや付着藻類などの $\delta^{13}\text{C}$ は、海域の植物プランクトンよりも低い値を示すことが知られている (Ogawa and Ogura, 1997)。また、多摩川水系でのPOMの $\delta^{13}\text{C}$ は $-26.9 \pm 1.1\%$ であり (Ogawa and Ogura, 1997)、この値は本海域で冬季に見られた値に

近い。さらに、 $\delta^{13}\text{C}$ はC/N比よりも塩分と高い相関関係が認められたことから、本調査時には、夏季には海洋植物プランクトンが、秋季・冬季には河川内で生産された植物プランクトンなど、 C_3 陸上高等植物以外の物質が多く供給された可能性も否定できない。これら植物プランクトンなどの一次生産者の同位体比は利用する基質の同位体比に支配されることが知られている (和田, 1986)。また溶存態無機炭素 (DIC) の $\delta^{13}\text{C}$ は、海域よりも河川のほうが低い値を示すことが知られている (Chanton and Lewis, 1999)。これらのことから、河川流量の増加する秋季と冬季には、湾内表層は低塩分化するため、海洋植物プランクトンが河川から供給されたDICを取り込み、POMの $\delta^{13}\text{C}$ が低下した可能性も考えられる。本研究ではDICや溶存態無機窒素 (DIN) の同位体比は測定していないため、今後は栄養塩を含めた基質との関係性についての解析も必要となる。

湾内に堆積する有機物の起源と量

湾内のSOMのTOC、TN濃度は季節を通して湾西部 (W5, W6, W7, W8, W9, W10) で低く、湾東部 (W1, W2, W3, W4, S3, S4, S5, S6) で高い傾向が共通して見られた (Figs. 4, 5)。特に、春季のW1でその濃度が最も高かった ($32.7 \text{ mg C} \cdot \text{g}^{-1}$, $2.4 \text{ mg N} \cdot \text{g}^{-1}$)。これらの値は、日本国内の富栄養海域として知られる大阪湾の湾中央部における堆積物中のTOCおよびTN濃度 (最大 $32 \text{ mg C} \cdot \text{g}^{-1}$, $2.8 \text{ mg N} \cdot \text{g}^{-1}$; Mishima et al., 1999) と同レベルであり、小浜湾東部ではかなり大量の有機物が堆積していることを示している。一方、湾の西部では $9.3\text{--}18.3 \text{ mg C} \cdot \text{g}^{-1}$ および $1.2\text{--}1.9 \text{ mg N} \cdot \text{g}^{-1}$ を示し、湾東部とは異なる有機物量であった。このような空間的な違いは湾東部に流入する河川の影響の違いによるものと考えられる。そこで、SOMの $\delta^{13}\text{C}$ およびC/N比を用いて堆積する有機物の起源を推定した。

小浜湾のSOMの $\delta^{13}\text{C}$ は、河口に最も近いS1やS2 (-26.5% から -24.7%) よりも河口沖合のW1で最も低い値を示した (-28.7% から -26.1%)。S1やS2では水深が1–3 m程度と浅く、W1では6 m以深となる。そのためS1やS2ではフラッシングの影響が大きく、物質が沖合へと輸送されやすいことから、北川から供給された有機物が堆積しにくい環境であると考えられる。しかしながらその後は、河口から離れるにつれて値が増加し、W7では季節を通して最も高い値 (-21.8% から -21.1%) を示した (Fig. 6)。このような空間変化は $\delta^{15}\text{N}$ でも同様に認められた (Fig. 7)。また、C/N比ではW1では季節を通して最も高い値を示し (12.7–17.9)、W5では常に低い値が認められた (7.5–9.2)。海洋植物プランクトンと C_3 陸上高等植物の $\delta^{13}\text{C}$ およびC/N比は大きく異なることが知られている (Parsons et al., 1961; Hedges et al., 1986; 和田, 1986)。W1で見られたSOMの $\delta^{13}\text{C}$ およびC/Nは、他の地点と比較して C_3 陸上高等植物の値に近いことから、河川から供給された C_3 陸上高等植物が多く堆積していることが示唆される。一方W5のように、

河口から離れた地点においては海洋植物プランクトンの値に近く、このことからC₃陸上高等植物の影響は小さいものと考えられる。しかしながら、表層POMが表層堆積物への潜在的な供給源として考えられるにもかかわらず、小浜湾内の表層水中のPOMの $\delta^{13}\text{C}$ およびC/NはSOMの $\delta^{13}\text{C}$ およびC/Nとは異なるものであった。北川で採取されたPOMの $\delta^{13}\text{C}$ およびC/Nの結果では、河川流量が少ないときは植物プランクトンや底生微細藻などの有機物が供給され、河川流量が増加するに従いC₃陸上高等植物の供給量が増加することが示唆されている（佐藤ほか、未発表）。また伊勢湾においても、平水時でなく出水時に多くのC₃陸上高等植物が湾内へ供給されることが報告されている（杉本ほか、2004; Sugimoto et al., 2006）。本調査時には、河川流量には劇的な増加が見られないことから（Fig. 2）、調査時以外にC₃陸上高等植物が小浜湾へと供給されたため、海域表層水中のPOMとSOMの $\delta^{13}\text{C}$ およびC/Nに違いが認められたものと思われる。以上のことからSOMの $\delta^{13}\text{C}$ およびC/Nの空間的な変化は、河川から供給されるC₃陸上高等植物と海域で生産される海起源有機物の割合の変化により生じているものと考えられる。そこで、 $\delta^{13}\text{C}$ から(2)を用いて海域に堆積するC₃陸上高等植物の寄与率(T)を評価した。

$$T(\%) = \frac{(\delta^{13}\text{C}_{\text{MPOM}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{SOM}})}{(\delta^{13}\text{C}_{\text{MPOM}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{Terrestrial}})} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{MPOM}}$ は塩分から判断して河川水の影響が最も少ないと考えられる5月および8月に実測された表層POMの平均値 -21.9% （Fig. 3d）、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Terrestrial}}$ は北川で採取されたC₃陸上高等植物の -29.0% 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOM}}$ は各地点で得られたSOMの $\delta^{13}\text{C}$ 値を用いた。また、寄与率が負の値になった場合は0%とみなした。計算結果をTable 4に示す。小浜湾内におけるC₃陸上高等植物の堆積率は0–95.8%の間で変化した。調査期間を通して、北川および南川河口沖合のW1で最も高く（59.2–95.8%）、河口から離れるにつれC₃陸上高等植物の堆積率は減少した。また、W7では常に0%であった。湾東部（W1, W2, W3, W4, S1, S2, S3, S4, S5, S6）のC₃陸上高等植物の堆積率は、湾西部（W5, W6, W7, W8, W9, W10）と比較して常に高かった。このような空間分布は、小浜湾内には反時計回りの還流が存在すること（磯部・相原, 1976）、また湾内に流入する主要河川である北川および南川が湾東部に位置していることによると考えられる。すなわち、湾口西部より若狭湾の海水が湾内へと流入するため、湾西部では海域で生産された有機物が堆積しやすく、湾東部では河川から供給されたC₃陸上高等植物が堆積しやすくなると考えられる。ただし、C₃陸上高等植物はセルロースやリグニンなど難分解性有機物を多く含むため微生物分解を受けにくく、一方植物プランクトンは

Table 4. Deposit rates (%) of the terrestrial plants estimated from the carbon stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) of sedimentary organic matter and marine particulate organic matter in May, August, November 2007 and February 2008.

Station	May	Aug.	Nov.	Feb.
W1	71.8	71.5	95.8	59.2
W2	46.5	46.8	53.5	50.7
W3	19.7	16.6	22.0	19.7
W4	ND	35.2	52.1	50.7
W5	0	0	21.2	24.0
W6	19.7	23.1	28.2	15.5
W7	0	0	0	0
W8	11.3	6.7	12.7	11.3
W9	8.5	6.5	14.1	8.5
W10	15.5	13.7	18.7	36.6
S1	ND	64.5	59.5	39.5
S2	ND	54.0	57.2	54.9
S3	ND	49.0	65.0	45.1
S4	ND	30.9	54.9	35.2
S5	ND	33.7	57.8	9.9
S6	ND	ND	36.6	33.8

ND: no data

このような物質を含まないため、微生物分解を受けやすく、両方で分解速度が異なる（Enriquez et al., 1993）。この仮定にたつと、本研究で示したC₃陸上高等植物の堆積率が一部過大評価されている恐れがある。

上述の議論では、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{MPOM}}$ の代表値として -21.9% を用いたが、POMの $\delta^{13}\text{C}$ は大きく変化することが報告されている。例えば、中緯度域における植物プランクトンは約 -20% 程度の値を示すが（和田, 1986）、夏季の東京湾においては -20% よりも高い値を示すことが報告されている（小倉ほか, 1986; 小川ほか, 1994）。本研究においては、東京湾の例のような極めて高い値は観測されなかったが、冬季および秋季における $\delta^{13}\text{C}$ は -29.0% から -23.9% と低い値を示した。そのため、C₃陸上高等植物の堆積率は過大に評価しているおそれがある。そこで、低い $\delta^{13}\text{C}_{\text{MPOM}}$ が観測された秋季および冬季において再度計算を試みた。秋季には -28.3% 、冬季には -29.0% を用いて計算したところ、C₃陸上高等植物の秋季のW1では57.1%まで低下し、冬季のW1を含むその他の全地点では0%と評価された。しかしながら、秋季および冬季におけるSOMのC/N比は6.5–15.4の間で変化し、その多くは海洋植物プランクトンのC/Nとされている5–10程度の値（Parsons et al., 1961）よりも高かった。これらのことから、湾東部ではかなり多くのC₃陸上高等植物が堆積しているものと考えられる。今後はC₃陸上高等植物のより正確な堆積率を評価するために、主成分であるリグニンやセルロースなどがSOM中にどれ

くらい含まれているのかを評価することが必要となる。

本研究において、小浜湾における堆積物中の有機物量および起源は湾西部と湾東部で大きく異なっていることが明らかとなった。とくに、湾東部海域の有機物量は多く、その量は大阪湾の中央部と同程度であった。また、 $\delta^{13}\text{C}$ およびC/Nから起源を推定したところ、湾西部においては、海域で生産された海洋植物プランクトンが、湾東部では河川から供給されたC₃陸上高等植物などの陸起源有機物が多く堆積していることが示唆された。特に河口付近のW1ではC₃陸上高等植物の堆積率が湾内で最も高く、最大95.8%と見積もられた。このような有機物の空間分布は、小浜湾が潮汐作用による河川内への塩水侵入が小さい日本海側に位置していることから、河口域での凝集作用の影響が小さいこと、また本海域に流入する主要な河川が湾東部に集中し、さらに湾内に存在する反時計回りの還流の影響で、河川より供給された物質が湾西部に輸送されにくいことから生じているものと考えられる。近年になり、魚類の餌料源として挙げられる二枚貝や多毛類の一部がC₃陸上高等植物の主要な構成物であるセルロースを分解する酵素を保有しているという結果が報告されつつある(Niiyama and Toyohara, 2007; Antonio et al., 2010; Ito et al., 2011)。今後は海洋食物網におけるC₃陸上高等植物の重要性を評価するために、C₃陸上高等植物を餌料源として利用できる生物のスクリーニングや河口沿岸域における食物網構造を把握し、海域で生産される有機物と陸域から供給される有機物の相対的寄与率を評価することが望まれる。

謝 辞

野外調査の際、甚大なご協力をいただいた福井県水産試験場調査船「若潮丸」船長柴野富士夫氏ならびに乗組員方々に感謝の意を表す。本研究は、京大大学生態学研究センターの共同利用施設(安定同位体比質量分析計)を使用して行なった。また安定同位体比分析を行うにあたり、京大大学生態学研究センター准教授陀安一郎博士にご指導いただいた。ここに記して、厚く御礼申し上げる。

引用文献

Andrews, J. E., A. M. Greenaway and P. F. Dennis (1998) Combined carbon isotope and C/N ratios as indicators of source and fate of organic matter in a poorly flushed, tropical estuary: Junts Bay, Kingston Harbour, Jamaica. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **46**, 743–756.

Antonio, E. S., A. Kasai, M. Ueno, Y. Kurikawa, K. Tsuchiya, H. Toyohara, Y. Ishihi, H. Yokoyama and Y. Yamashita (2010) Consumption of terrestrial organic matter by estuarine molluscs determined by analysis of their stable isotopes and cellulase activity. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **86**, 401–407.

Attrill, M. J., S. D. Rundle, A. Fraser and M. Power (2009) Oligochaetes as a possible entry route for terrigenous organic carbon into estuarine benthic food webs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **384**, 147–157.

Benner, R. (2004) What happens to terrestrial organic matter in the ocean? *Mar. Chem.*, **92**, 307–310.

Chanton, J. P. and F. G. Lewis (1999) Plankton and dissolved inorganic carbon isotopic composition in a river-dominated estuary: Apalachicola Bay, Florida. *Estuaries*, **22**, 575–583.

Darnaude, A. M. (2005) Fish ecology and terrestrial carbon use in coastal areas: implications for marine fish production. *J. Anim. Ecol.*, **74**, 864–876.

Enríquez, S., C. M. Duarte and K. Sand-Jensen (1993) Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: the importance of detritus C: N: P content. *Oecologia*, **94**, 457–471.

Fry, B. and E. B. Sherr (1984) $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. *Contrib. Mar. Sci.*, **27**, 13–47.

Harmelin-Vivien, M., J. Dierking, D. Bănar, M. F. Fontaine and D. Arlhac (2010) Seasonal variation in stable C and N isotope ratios of the Rhone River inputs to the Mediterranean Sea (2004–2005). *Biogeochemistry*, **100**, 139–150.

Hedges, J. I., W. A. Clark, P. D. Quay, J. E. Richey, A. H. Devol and U. M. Santos (1986) Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River. *Limnol. Oceanogr.*, **31**, 717–738.

Hu, J., P. Peng, G. Jia, B. Mai and G. Zhang (2006) Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopes in sediments of the subtropical Pearl River estuary and adjacent shelf, Southern China. *Mar. Chem.*, **98**, 274–285.

磯部一洋・相原輝雄(1976) 福井県小浜湾の海況について。地質調査所月報, **27**, 1–14.

磯貝 明(2003) セルロースの科学。朝倉書店, 東京。1–9.

Ito, K., M. Nozaki, T. Ohta, C. Miura, Y. Tozawa and T. Miura (2011) Differences of two polychaete species reflected in enzyme activities. *Mar. Biol.*, **158**, 1211–1221.

Kang, C. K., J. B. Kim, K. S. Lee, J. B. Kim, P. Y. Lee and J. S. Hong (2003) Trophic importance of benthic microalgae to macrozoobenthos in coastal bay systems in Korea: dual stable C and N isotope analyses. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **259**, 79–92.

Kasai, A. and A. Nakata (2005) Utilization of terrestrial organic matter by the bivalve *Corbicula japonica* estimated from stable isotope analysis. *Fish. Sci.*, **71**, 151–158.

Kikuchi, E. and E. Wada (1996) Carbon and nitrogen stable isotope ratios of deposit-feeding polychaetes in the Nanakita River Estuary, Japan. *Hydrobiologia*, **321**, 69–75.

McLeod, R. J. and S. R. Wing (2009) Strong pathways for incorporation of terrestrially derived organic matter into benthic communities. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **82**, 645–653.

Mishima, Y., A. Hoshika and T. Tanimoto (1999) Deposition rates of terrestrial and marine organic carbon in the Osaka Bay, Seto Inland Sea, Japan, determined using carbon and nitrogen stable isotope ratios in the sediment. *J. Oceanogr.*, **55**, 1–11.

Niiyama, T. and H. Toyohara (2007) Cellulose digestion by common Japanese freshwater clam *Corbicula japonica*. *Fish. Sci.*, **73**, 675–683.

小川浩史・青木延浩・近磯 晴・小倉紀雄(1994) 夏季の東京湾における懸濁態および堆積有機物の炭素安定同位体比。地球化学, **28**, 21–36.

Ogawa, N. and N. Ogura (1997) Dynamics of particulate organic matter in the Tamagawa Estuary and inner Tokyo Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **44**, 263–273.

小倉紀雄・木村健司・関川朋樹・山田和人・南川雅男(1986) 東京湾内湾部における懸濁有機物の炭素安定同位体比。地球化学, **20**, 13–19.

奥田節夫(1996) 感潮河川における堆積環境。河川感潮域—その自然と変貌—。西條八東・奥田節夫編, 名古屋大学出版会, 名古屋, 85–105.

Parsons, T. R., K. Stephens and J. D. H. Strickland (1961) On the chemi-

- cal composition of eleven species of marine phytoplankton. J. Fish. Res. Board Can., **18**, 1001–1016.
- Peters, K. E., R. E. Sweeney and I. R. Kaplan (1978) Correlation of carbon and nitrogen stable isotope ratios in sedimentary organic matter. Limnol. Oceanogr., **23**, 598–604.
- Peterson, B. J. and B. Fry (1987) Stable isotopes in ecosystem studies. Annu. Rev. Ecol. Syst., **18**, 293–320.
- Riera, P., L. J. Stal, J. Nieuwenhuize, P. Richard, G. Blanchard and F. Gentil (1999) Determination of food sources for benthic invertebrates in a salt marsh (Aiguillon Bay, France) by carbon and nitrogen stable isotopes: importance of locally produced sources. Mar. Ecol. Prog. Ser., **187**, 301–307.
- Rivera-Monroy, V. H., C. J. Madden, J. W. Day, R. R. Twilley, F. Vera-Herrera and H. Alvarez-Guillén (1998) Seasonal coupling of a tropical mangrove forest and an estuarine water column: enhancement of aquatic primary productivity. Hydrobiologia, **379**, 41–53.
- 杉本 亮・笠井亮秀・山尾 理・藤原建紀・木村琢磨 (2004) 伊勢湾における河川流量の変動に伴う懸濁態有機物の変化. 水産海洋研究, **68**, 142–150.
- Sugimoto, R., A. Kasai, S. Yamao, T. Fujiwara and T. Kimura (2006) Short-term variation in behavior of allochthonous particulate organic matter accompanying changes of river discharge in Ise Bay, Japan. Estuar. Coast. Shelf Sci., **66**, 267–279.
- 富永 修・牧田智弥 (2008) 森川海のつながりと河口・沿岸域の生物生産. 「沿岸域の底生生物生産への陸上有機物の貢献」山下 洋・田中 克編. 恒星社厚生閣, 東京. 46–58.
- Usui, T., S. Nagao, M. Yamamoto, K. Suzuki, I. Kudo, S. Montani, A. Noda and M. Minagawa (2006) Distribution and sources of organic matter in surficial sediments on the shelf and slope off Tokachi, western North Pacific, inferred from C and N stable isotopes and C/N ratios. Mar. Chem., **98**, 241–259.
- 和田英太郎 (1986) 生物関連分野における同位体効果—生物界における安定同位体分布の変動. Radioisotopes, **35**, 136–146.
- Walsh, J. J. (1991) Importance of continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen. Nature, **350**, 53–55.
- Yokoyama, H. and Y. Ishihi (2003) Feeding of the bivalve *Theora lubrica* on benthic microalgae: isotopic evidence. Mar. Ecol. Prog. Ser., **255**, 303–309.
- Yokoyama, H., A. Tamaki, K. Koyama, Y. Ishihi, K. Shimoda and K. Harada (2005) Isotopic evidence for phytoplankton as a major food source for macrobenthos on an intertidal sandflat in Ariake Sound, Japan. Mar. Ecol. Prog. Ser., **304**, 101–116.