



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	過栄養内湾（洞海湾）における粒子状物質の生化学的特徴と 鉛直輸送過程の季節変化
Author(s)	濱田, 建一郎; 上田, 直子; 山田, 真知子 他
Citation	沿岸海洋研究, 48(1), 75-85
Issue Date	2010-08-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56487
Type	journal article
File Information	138)montani-engankaiyo-48(1).pdf



過栄養内湾（洞海湾）における粒子状物質の生化学的特徴と鉛直輸送過程の季節変化*

濱田建一郎^{*,†}・上田 直子^{**}・山田真知子^{††}・多田 邦尚[#]・門谷 茂[†]

Seasonal Changes in Biochemical Characteristics and Vertical Transport of Particulate Organic Matter in Hypertrophic Dokai Bay, Japan

Kenichiro Hamada, Naoko Ueda, Machiko Yamada, Kuninao Tada and Shigeru Montani

過栄養内湾である洞海湾において季節毎に粒子状物質の採取を行い、その生化学的特徴から起源を推定した。また、有機態炭素や Chlorophyll *a* を指標として粒子状物質の鉛直輸送過程の季節変化について考察した。その結果、過栄養化した内湾の見かけ上の沈降粒子束の多寡は、密度成層の強弱による海水の上下混合に支配されていることが確認された。水柱中に存在する懸濁粒子の主要な起源は植物プランクトンと推定されたが、セディメントトラップに捕集された粒子状物質に占める懸濁粒子由来の割合は有機態炭素を指標としたとき、約35%であった。有機態炭素を指標として水柱中の現存量と沈降除去量を比較検討したところ、以下の3パターンが存在した。(1)現存量は多いが成層期のためフラックスは小さい(夏季)。(2)現存量は多くないが循環期のためフラックスは大きい(春季・秋季)。(3)循環期だが沈降除去率が小さいためフラックスも小さい(冬季)。また、植物プランクトンを主な起源とする粒子状物質の鉛直フラックスを Chlorophyll *a* を指標として検討した結果、季節毎に変化する植物プランクトン量と密度成層の強弱との相互関係でフラックスは決まると考えられた。

We used biochemical characteristics to infer the origin of particulate organic matter collected every season in a hypertrophic embayment (Dokai Bay, Japan). In addition, we evaluated seasonal changes in the vertical transport processes within the embayment, using organic carbon and chlorophyll *a* as indices. Our findings suggest that mass flux was influenced by the strength of density stratification and mixing of the water mass. The main source of suspended particulate matter was presumed to have originally been phytoplankton. However, using organic carbon as an index, we determined that suspended particulate matter accounted for only about 35% of the particulate organic matter collected by sediment traps. We compared the standing stock of particulate organic carbon and the amount removed through sinking in the water column and found three patterns. (1) When the water column was highly stratified in summer, the particulate flux was small, although the standing stock was high. (2) When the water column was well mixed in spring and autumn, the particulate flux was high, although the standing stock was lower. (3) When the water column was mixed in winter, the particulate flux was small, since the removal ratio was low. Finally, using chlorophyll *a* as an index for the vertical flux of particulate organic matter of phytoplankton origin, we determined that this flux was controlled by the relationship between the amount of phytoplankton and the strength of density stratification, both of which varied seasonally.

キーワード：粒子状物質，有機態炭素，フラックス，洞海湾，過栄養内湾

1. はじめに

水中に存在する粒子状物質は、一次生産活動を主な起源とする内部生産由来の物質と陸域から負荷される外部

由来の物質に大別できる。これら粒子状物質中の有機物は沈降によって水柱中から除去されるが、海底に堆積した有機物は栄養塩類の再溶出によって水質悪化の原因ともなっている。閉鎖性が強く、富栄養化した内湾の物質循環機構解明のためには、鉛直輸送される粒子状物質の質や量を把握することは不可欠だが評価は難しい。その要因として、富栄養化した内湾の多くは、水深が浅く風波の影響を受けやすいことや、河川から供給される淡水の混合による有機物の凝集沈殿や分解などの物理・化学過程が挙げられる。近年、日本沿岸の内湾においても富

* 2009年8月7日受領, 2010年4月19日受理

** 北九州市立大学アクア研究センター

† 北海道大学大学院環境科学院

†† 福岡女子大学人間環境学部

香川大学農学部

連絡先：濱田建一郎，北九州市立大学アクア研究センター

〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1

E-mail: k-hamada@env.kitakyu-u.ac.jp

栄養化機構解明の手法の一つとしてセディメントトラップを用いた粒子状物質の沈降フラックスを求める試みが行われるようになり、東京湾(柳, 1991¹⁾; 乗木ほか, 1994²⁾; 門谷, 1993³⁾; 佐々木, 1991⁴⁾), 大阪湾(Montani *et al.*, 1991⁵⁾), 広島湾(清木ほか, 1985⁶⁾)などで観測が実施され、富栄養化した内湾の環境特性が明らかになってきている。しかし、過栄養内湾の粒子状物質の時空間分布や生化学的特徴の季節変化を明らかにした例はない。

九州北部に位置する洞海湾は、全長13 km、湾口幅1.2 km、湾奥幅0.3 km、航路域の平均水深7 mの細長い形状をした内湾である。かつては洞海湾沿岸に立地した重化学工場からの排水により「死の海」と呼ばれるほどひどく汚染された内湾であったが、1970年代から導入された工場排水規制や堆積汚泥の浚渫除去により湾内海水は見た目には正常さを取り戻してきた。しかし DIN, DIP の年平均値はいずれも760 μM , 5.6 μM と依然として高く、赤潮や貧酸素水塊が発生する過栄養状態にある(梶原・山田, 1997⁷⁾; 東ほか, 1998⁸⁾)。そのため高濃度に存在する栄養塩を利用して周年を通じて多量の粒子状有機物が内部生産されていると考えられる。本研究では過栄養内湾である洞海湾において季節毎に粒子状物質の採取を行い、その生化学的特徴や時空間分布から起源を推定した。また、有機態炭素と Chlorophyll *a* (以下 Chl *a* と略す) を指標として基礎生産由来の粒子状物質の鉛直輸送過程における季節変化の評価を試みた。

2. 方 法

2.1 海洋観測

海洋観測は Fig. 1 に示した湾内7箇所の調査地点において実施した。観測は1997年4月から1998年3月まで毎月1回 STDO メータ(アレック電子 ADR1000)を使用して水温、塩分、水中蛍光強度の測定を表層から1 m 毎に海底1 m 直上まで行った。粒子状物質は、1997年5月29日、8月21日、11月18日および1998年2月11日に表層から2 m 毎にバンドン採水器(5 L)を用いて海水試料として採取した。また、M型セディメントトラップ(Montani *et al.*, 1988⁹⁾)を湾内3箇所(Stn. 2, Stn. 4, Stn. 6)の水深3 m と水深7 m に24時間係留して捕集した粒子状物質を沈降粒子とした。海底堆積物は1995年8月31日に KK 式採泥器を用いて柱状コアを採取し、表層(0–1 cm 層)を分析に供した。

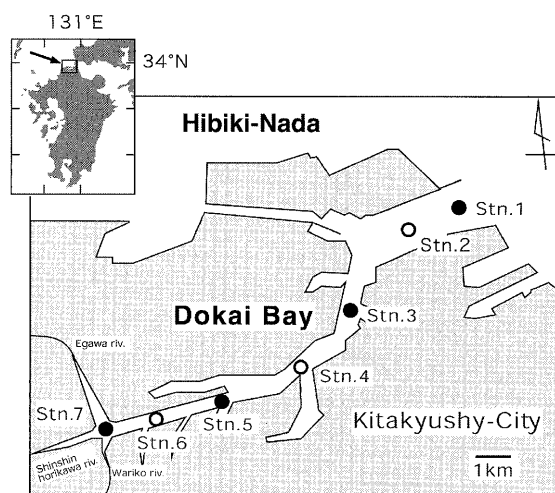


Fig. 1 Study area and location of observation stations.

○: Station with moored sediment traps.

●: Station without moored sediment traps.

2.2 分析方法

懸濁粒子は、予め450℃で3時間強熱処理し無機炭素を除去した Whatman GF/F フィルターを用いて一定量の海水試料をろ過し、フィルター上に残った粒子をフィルターごと-20℃で凍結保存した。これを凍結乾燥後、精秤して得られた値の差分を懸濁粒子重量とした。セディメントトラップにより捕集された沈降粒子は、トラップ回収後、直ちに実験室に持ち帰り、静置した後に上澄液を除去し、前述の懸濁粒子と同様の手法で沈降粒子重量を求め沈降粒子束を算出した。

粒子状物質中の有機態炭素・窒素の分析は、前述のように凍結乾燥処理したサンプルを CHN コーダ(柳本 MT-3)で定量した。全リンは凍結乾燥処理したサンプルを過硫酸カリウムにより分解(Menzel and Cowin, 1965¹⁰⁾)した後、モリブデンブルー法(Murphy and Riley, 1962¹¹⁾)で測定した。5月・8月・11月・2月の Chl *a* 含量は海水試料をろ過した Whatman GF/F フィルターを *N, N*-Dimethylformamide を用いて抽出した後(Suzuki and Ishimaru, 1997¹²⁾), Lorenzen (1967)¹³⁾の方法により測定して求めた。Phaeo-pigments (以下 Phaeo と略す)の測定はセディメントトラップにより捕集された沈降粒子についてのみ Lorenzen (1967)¹³⁾の方法に従って測定した。Chl *a* 濃度と水中の蛍光強度は良い相関が得られた(5月, $r=0.86$; 8月, $r=0.96$; 11月, $r=0.84$; 2月, $r=0.95$) ので、それ以外の月は、5月・8月・11月・2月の Chl *a* 濃度と蛍光強度の回帰分析を行い得られた回帰係数(5月, 0.27; 8月, 0.31; 11月, 0.19; 2月, 0.20)を用いて季節毎に蛍光強度を Chl *a* 濃度に換算した。

海底堆積物の有機態炭素・窒素の分析は、凍結乾燥したサンプルを、塩酸処理を行い炭酸塩を除去後、CHNコーダ（柳本 MT-3）で定量した。有機物量が多い海底堆積物の全リン試料の前処理は、凍結乾燥したサンプルに10% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ を添加、蒸発乾固した後に灰化（500℃、2時間）した。その後、1N-HClで抽出したサンプルをモリブデンブルー法（Murphy and Riley, 1962¹¹⁾）で測定した。

3. 結 果

3.1 物理環境

湾口（Stn.2）、湾央（Stn.4）、湾奥（Stn.6）における水温・塩分・海水密度（以後 σ_t とする）・Chl *a* の時系列変化を Fig. 2 に示した。調査期間中の水温は9.8～28.5℃であった。5月から9月にかけて表層水の水温は20℃を越え、8月には表層水と底層水の間で約2℃の水温差が認められたが、それ以外の観測日に鉛直的な温度差は認められなかった。塩分は12.1～34.3で、いずれの観測日においても湾奥表層で低く湾口に向かって次第に

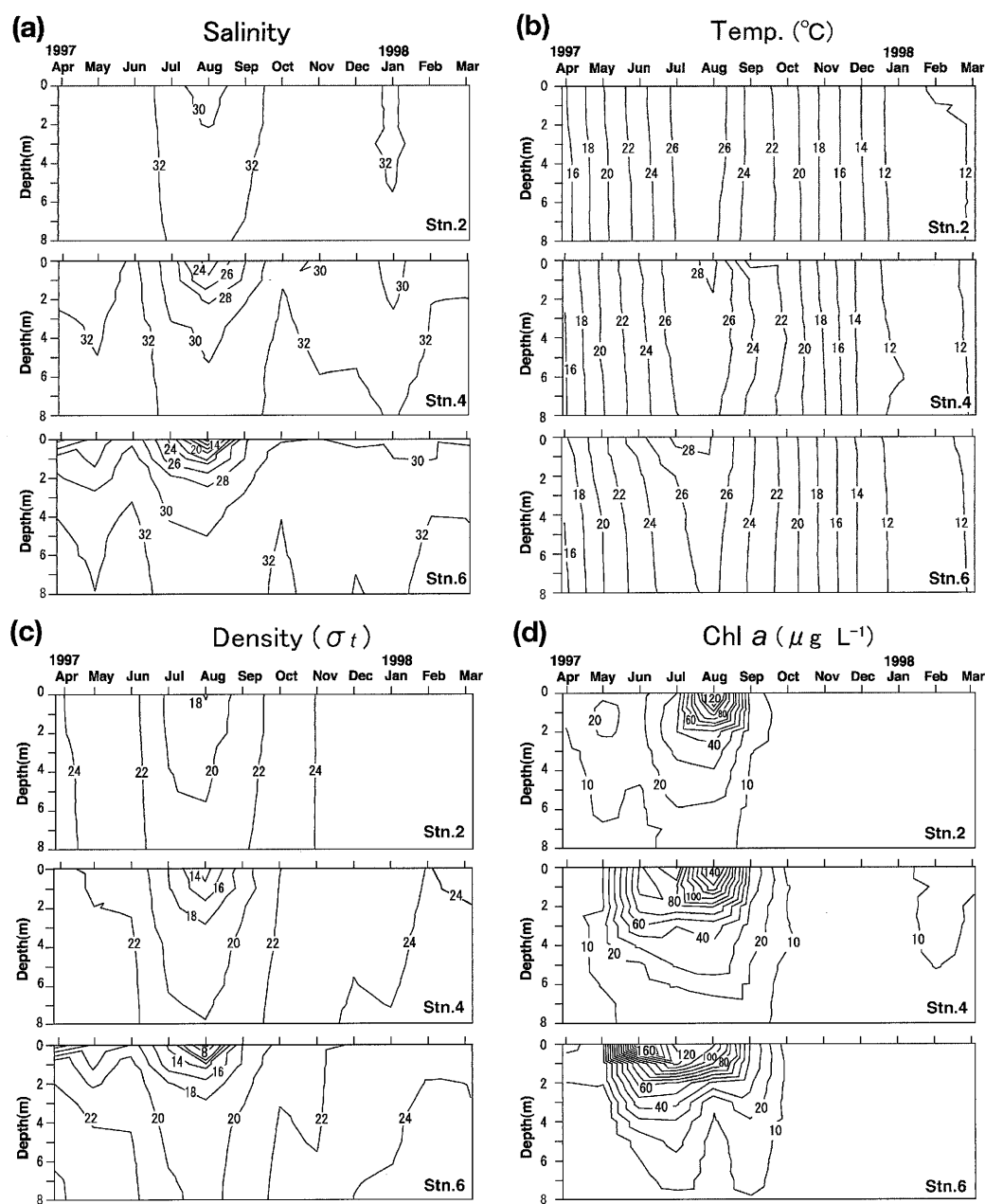


Fig. 2 Seasonal changes in vertical profiles of (a) salinity, (b) temperature, (c) density and (d) chlorophyll *a* (Chl *a*) at Stations 2, 4 and 6 in Dokai Bay.

高くなっていた。この傾向は梅雨の影響で塩分が低くなる8月に著しかった。 σ_t は5.1~26.0で、塩分が低くなる5月から8月は湾奥から湾央表層にかけて密度成層が認められたが、それ以外の季節は鉛直的に様であった。そのため洞海湾の海洋構造は、夏季を中心とした成層期とそれ以外の循環期に分けられると考えられた。調査期間中の Chl *a* 濃度は n.d.~146 $\mu\text{g L}^{-1}$ で、8月は湾内全域の表層2m以浅において30 $\mu\text{g L}^{-1}$ 以上と高く海水が赤褐色に着色しており赤潮状態であった。また、5月と2月の表層でも10 $\mu\text{g L}^{-1}$ 以上の地点が観測されたことから、周年を通じて Chl *a* 濃度の高いことがわかった。

3.2 沈降粒子の親生物元素含量と粒子束

沈降粒子中の親生物元素含量(平均値)は、有機態炭素18.0~107 mg g^{-1} (64.8 mg g^{-1})、有機態窒素1.45~11.7 mg g^{-1} (5.84 mg g^{-1})、全リン0.11~2.50 mg g^{-1} (0.89 mg g^{-1})であった(Table 1)。植物プランクトン由来の色素量についてみると Chl *a* 含量と Phaeo 含量(平均値)はそれぞれ0.01~0.54 mg g^{-1} (0.12 mg g^{-1})、0.021~1.73 mg g^{-1} (0.394 mg g^{-1})であった。親生物元素含量の平均値について地点や季節毎に比較を試みたが全リンを除き差は見られなかった。全リンの平均値は5月0.93 mg g^{-1} 、8月1.49 mg g^{-1} で11月0.58 mg g^{-1} や2月0.54 mg g^{-1} と比べ約2倍以上高い値を示した。Chl

a 含量の地点毎の平均値を比較すると湾奥 Stn. 6 (0.08 mg g^{-1}) は他の2地点の平均値 (Stn. 2 ; 0.12 mg g^{-1} , Stn. 4 ; 0.15 mg g^{-1}) に比べて低い傾向であった。季節毎の Chl *a* 含量の平均値を見ると5月 (0.19 mg g^{-1}) や11月 (0.17 mg g^{-1}) は赤潮が発生している8月 (0.09 mg g^{-1}) より高い値を示した。Phaeo 含量の地点毎の平均値を比較すると湾央 Stn. 4 (0.497 mg g^{-1}) が他の2地点より高かった。Phaeo 含量の季節毎の平均値は2月 (0.055 mg g^{-1}) < 11月 (0.355 mg g^{-1}) $\div$ 8月 (0.366 mg g^{-1}) < 5月 (0.799 mg g^{-1}) の順に大きくなった。

沈降粒子束(平均値)は12.5~297 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ (70.6 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$)であった(Table 2)。全調査を通して、水深3mより7mで得られた沈降粒子束の方が大きかった。季節毎の沈降粒子束平均値を比較したところ、8月 (35.4 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$)は他の季節(5月; 63.8 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$, 11月; 89.8 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$, 2月; 93.4 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$) に比べ低かった。また、調査地点毎の沈降粒子束の平均値を比較すると湾口 Stn. 2 (42.3 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$)は湾央 (105 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$) や湾奥 (64.1 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$) より低い傾向であった。各親生物元素含量から求めたフラックスを見ると有機態炭素フラックス(平均値)は0.77~17.6 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ (4.25 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$)、有機態窒素フラックスは0.08~0.94 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ (0.33 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$)、全リンフラックスは0.016~0.065 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ (0.037 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$)

Table 1 Chemical composition of sinking particles.

Date	Stn.	Depth (m)	C	N	P	C:N (mol ratio)	Chl <i>a</i> (mg g ⁻¹)	Phaeo (mg g ⁻¹)
May 1997	2	3	61.7	6.3	1.80	11.4	0.509	1.73
		7	49.5	5.2	0.68	11.2	0.114	0.268
	4	3	74.9	6.5	1.02	13.4	0.272	1.60
		7	61.4	5.9	0.32	12.1	0.051	0.313
	6	3	107	8.9	1.14	14.0	0.108	0.563
		7	95.2	6.5	0.64	17.2	0.072	0.321
Aug 1997	2	3	63.0	9.6	2.50	7.7	0.108	0.427
		7	27.3	3.5	0.80	9.2	0.044	0.093
	4	3	66.3	10.9	2.25	7.1	0.135	0.554
		7	51.8	4.8	0.81	12.6	0.044	0.194
	6	3	91.9	11.7	1.73	9.2	0.132	0.658
		7	80.2	7.2	0.82	12.9	0.046	0.269
Nov 1997	2	3	59.3	5.1	0.39	13.5	0.090	0.205
		7	33.7	3.1	0.29	12.8	0.040	0.111
	4	3	82.0	8.6	1.51	11.1	0.541	1.03
		7	18.0	1.5	0.21	14.5	0.058	0.187
	6	3	82.8	6.6	0.80	14.6	0.160	0.369
		7	68.7	4.0	0.30	20.0	0.069	0.230
Feb 1998	2	3	53.4	4.2	1.04	14.7	0.048	0.105
		7	47.1	2.8	0.31	19.6	0.020	0.032
	4	3	67.3	4.7	0.48	16.6	0.075	0.081
		7	59.2	3.1	0.11	22.3	0.012	0.021
	6	3	76.4	4.9	0.92	18.1	0.032	0.050
		7	77.9	4.6	0.38	19.9	0.030	0.044

Table 2 Sinking fluxes of particulate mass, organic carbon, organic nitrogen, total phosphorus, chlorophyll *a* (Chl *a*), phaeopigment (phaeo) and the rate of Chl *a* (%) compared to the total of Chl *a* and phaeo.

Date	Stn.	Depth (m)	Mass flux (g m ⁻² d ⁻¹)	C	N	P	Chl <i>a</i> (mg m ⁻² d ⁻¹)	Phaeo (mg m ⁻² d ⁻¹)	Chl <i>a</i> (%)
May 1997	2	3	12.5	0.77	0.08	0.022	6.4	21.6	22.8
		7	37.9	1.88	0.20	0.026	4.3	10.2	29.9
	4	3	31.0	2.32	0.20	0.032	8.4	49.5	14.5
		7	160	9.80	0.94	0.051	8.1	50.0	14.0
	6	3	56.7	6.07	0.50	0.065	6.1	31.9	16.1
		7	85.1	8.11	0.55	0.054	6.1	27.3	18.3
Aug 1997	2	3	17.1	1.08	0.16	0.043	1.9	7.3	20.2
		7	57.8	1.58	0.20	0.046	2.5	5.4	32.2
	4	3	16.9	1.12	0.18	0.038	2.3	9.4	19.6
		7	47.5	2.46	0.23	0.038	2.1	9.2	18.5
	6	3	25.5	2.34	0.30	0.044	3.4	16.8	16.7
		7	47.3	3.79	0.34	0.039	2.2	12.7	14.6
Nov 1997	2	3	47.2	2.80	0.24	0.018	4.2	9.7	30.4
		7	89.4	3.01	0.27	0.026	3.5	9.9	26.2
	4	3	41.1	3.37	0.35	0.062	22.2	42.4	34.4
		7	181	3.25	0.26	0.038	10.4	33.8	23.5
	6	3	46.3	3.83	0.31	0.037	7.4	17.1	30.2
		7	134	9.21	0.54	0.040	9.3	30.9	23.1
Feb 1998	2	3	24.1	1.29	0.10	0.025	1.2	2.5	31.5
		7	52.7	2.48	0.15	0.016	1.1	1.7	38.6
	4	3	69.2	4.65	0.33	0.033	5.2	5.6	48.1
		7	297	17.6	0.92	0.032	3.5	6.2	36.4
	6	3	35.2	2.69	0.17	0.033	1.1	1.8	38.9
		7	82.4	6.42	0.38	0.031	2.5	3.6	40.5

であった (Table 2). また, Chl *a* フラックスは $1.07 \sim 22.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ($5.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), Phaeo フラックスは $1.7 \sim 50.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ($17.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) であった. 各フラックスの調査地点毎の平均値を比較すると湾口 Stn. 2 の有機態炭素フラックス ($1.86 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) と有機態窒素フラックス ($0.17 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) は湾央 Stn. 4 や湾奥 Stn. 6 の値と比べて約 1/2 以下であった. 季節毎の各フラックスの平均値を比較すると, 8 月の有機態炭素フラックス ($2.06 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) は, 他の季節 ($4.25 \sim 5.86 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) の約 1/2 以下であった. Chl *a* フラックス平均値を調査毎に比較すると 8 月 ($2.38 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) は赤潮が発生していたにもかかわらず, 5 月 ($6.58 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) や 11 月 ($9.51 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) より低かった. Phaeo フラックスについても Chl *a* フラックスと同様の傾向であった. Chl *a* フラックスと Phaeo フラックスの合計に占める Chl *a* フラックスの割合を見ると, 平均値は約 23% であったが, 5 月 (19%) $\div$ 8 月 (20%) $<$ 11 月 (28%) $<$ 2 月 (39%) の順で, 冬季に大きくなる傾向が確認された (Table 2). また, Chl *a* フラックスと Phaeo フラックスの増減は良い相関が見られた ($r=0.75$, $p<0.01$).

3.3 懸濁粒子の親生物元素含量

調査期間中に得られた懸濁粒子の親生物元素含量を Table 3 に示した. 懸濁粒子量 (以後 SPM と略す) は $2.6 \sim 59.2 \text{ mg L}^{-1}$ であった. 季節毎の SPM 平均値を比較すると 11 月 (15.6 mg L^{-1}) が最も高く, 最も低かった 2 月 (7.6 mg L^{-1}) に比べ約 2 倍大きかった. しかし, 50 mg L^{-1} 以上の高い値が得られた 5 月 Stn. 2 の 8 m, 10 m を除けば地点や水深による分布に傾向は見られなかった. 懸濁粒子中の親生物元素含量は, 有機態炭素含量 (以後 POC とする) $10.9 \sim 259 \text{ mg g}^{-1}$, 有機態窒素含量 (以後 PON とする) $1.94 \sim 48.1 \text{ mg g}^{-1}$, 全リン含量 (以後 PP とする) $0.25 \sim 24.3 \text{ mg g}^{-1}$ であった. POC,

PON, PP とともに湾口から湾奥に向かって大きくなり, 表層で高い傾向が見られた. 季節毎の平均値を比較すると, 8 月の POC, PON, PP はそれぞれ 102 mg g^{-1} , 19.8 mg g^{-1} , 8.7 mg g^{-1} で最も高い値を示した. 懸濁粒子中の Chl *a* 濃度は周年を通じて高く, 季節毎の平均値を比較すると, 8 月は $42.7 \mu\text{g L}^{-1}$ で他の季節に比べ最も高い値を示した. また, POC, PON, PP と Chl *a* の鉛直分布は一致する傾向が見られた.

3.4 海底堆積物の親生物元素含量

海底堆積物表面 (0–1 cm 層) の親生物元素含量は, 有機態炭素 $9.5 \sim 89.1 \text{ mg g}^{-1}$, 有機態窒素 $0.2 \sim 3.7 \text{ mg g}^{-1}$, 全リン $0.21 \sim 1.26 \text{ mg g}^{-1}$ であった (Table 4). 各成分とも湾口から湾奥に向かって高くなっており, Stn. 6 で有機態炭素, 有機態窒素, 全リンともそれぞれ 89.1 mg g^{-1} , 3.7 mg g^{-1} , 1.26 mg g^{-1} の最高値を示した.

Table 4 Organic matter content of sediment.

Stn.	C N P			C:P N:P C:N		
	(mg g ⁻¹)			(mol ratio)		
1	9.5	0.5	0.36	68	3.1	22.2
2	4.2	0.2	0.21	51	2.5	20.3
3	12.2	0.6	0.41	77	3.2	23.7
4	17.1	0.8	0.67	66	2.6	24.9
5	53.5	2.2	0.92	150	5.3	28.4
6	89.1	3.7	1.26	183	6.5	28.1
7	67.6	2.6	1.07	163	5.4	30.3

4. 考 察

4.1 沈降粒子束の季節変化とその要因

今回の調査で得られた沈降粒子束 ($12.5 \sim 297 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) の値は, 東京湾 ($1.2 \sim 18.6 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$; 乗木ほか, 1994²⁾), 大阪湾 ($1.0 \sim 61.8 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$; Montani *et al.*, 1991⁵⁾), Dabob Bay ($1.3 \sim 16.0 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$; Hedges *et al.*, 1988¹⁴⁾), Potmac Estuary ($3.0 \sim 47.3 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$; Sigleo and Suchultz, 1993¹⁵⁾) と比較して全体的に高い傾向が見られた. また, 梅雨の影響で陸域からの負荷量増加が予想され赤潮が発生している夏季の沈降粒子束が他の季節に比べて低いことが特徴的であった. ここでは夏季の沈降粒子束に注目して, 季節変化の要因について検討を試みた. 夏季は高水温のためトラップ設置期間中に捕集物が分解減少する可能性が考えられるが, Taguchi (1982)¹⁶⁾ はハワイのオアフ島 Kaneohe Bay で実施した調査結果から, トラップ設置時間が 24 時間以内であれば捕集物重量の減少は 5 % 以下で結果に及ぼす影響

Table 3 Chemical composition of suspended particulate matter (SPM) in Dokai Bay.

Abbreviations: POC- particulate organic carbon; PON- particulate organic nitrogen; PP- particulate total phosphorus.

Date	SPM (mg L ⁻¹)	Chl <i>a</i> (μg L ⁻¹)	POC (mg g ⁻¹)	PON (mg g ⁻¹)	PP (mg g ⁻¹)	C:N (mol ratio)	n
May 1997	9.2 ± 11.8 (3.5 ~ 59.2)	9.5 ± 6.7 (n.d ~ 30.4)	96.9 ± 47.3 (10.9 ~ 259)	16.0 ± 9.0 (2.1 ~ 48.1)	4.21 ± 2.91 (0.25 ~ 17.0)	7.4 ± 1.8 (5.9 ~ 14.9)	31
Aug 1997	11.0 ± 2.0 (7.3 ~ 15.3)	42.7 ± 40.8 (4.8 ~ 146)	102 ± 55.6 (38.4 ~ 224)	19.8 ± 12.2 (5.5 ~ 47.8)	8.68 ± 6.47 (1.77 ~ 24.3)	6.3 ± 0.8 (4.8 ~ 8.2)	34
Nov 1997	15.6 ± 9.0 (5.3 ~ 41.6)	3.6 ± 2.0 (0.9 ~ 8.9)	39.9 ± 13.9 (11.1 ~ 65)	5.9 ± 2.4 (1.9 ~ 12.6)	1.13 ± 0.69 (0.35 ~ 3.78)	8.1 ± 1.2 (5.9 ~ 10.7)	33
Feb 1998	7.6 ± 4.3 (2.6 ~ 21.2)	7.5 ± 3.8 (1.7 ~ 19.6)	71.7 ± 20.1 (31.3 ~ 114)	11.8 ± 4.6 (4.9 ~ 23.6)	2.92 ± 1.08 (1.15 ~ 5.50)	7.5 ± 1.7 (5.3 ~ 11.2)	34

Upper line: Values are mean ± SD.

Lower line: Values in parentheses are approximate ranges (min ~ max).

はほとんど無いと述べている。また、Montani *et al.* (1988)⁹⁾は夏季の播磨灘のトラップ捕集物で分解試験を行い、粒子状有機炭素や窒素の減少は小さいことを確認していることから、夏季の低い沈降粒子束は捕集物の分解した結果では無いと考えられた。次に佐々木ほか (1999)¹⁷⁾や Tsutsumi *et al.* (2006)¹⁸⁾が沿岸域の沈降粒子束の変動要因として指摘する密度成層と沈降粒子束の関係について検討した。洞海湾奥部には3本の2級河川が流入しているため、山田・梶原 (2004)¹⁹⁾は洞海湾で形成される密度成層は塩分が効いているとしている。本調査でも塩分と密度の経月変化 (Fig. 2) をみると、夏季を中心に表層の塩分の低下により密度成層が形成され、湾口 Stn. 2 より湾奥 Stn. 6 で強くなることが観測されている。密度成層の強度は武岡 (1985)²⁰⁾の方法を参考にして、表層 (0 m) とトラップ設置水深 (3 m 及び 7 m) の密度差を密度成層の強さ (以下 $\Delta\sigma_t$ とする) として求めた。調査期間中の $\Delta\sigma_t$ は $-0.7 \sim 13.4$ の範囲であった。季節毎の平均値 (中央値) を比較すると8月の $\Delta\sigma_t$ は6.9 (5.9) で、5月: 1.7 (0.9), 11月: 0.0 (0.0), 2月: 1.0 (0.8) より大きく、成層が強くなることが確認された。調査地点毎の $\Delta\sigma_t$ の平均値は Stn. 2: $0.7 <$ Stn. 4: $1.7 <$ Stn. 6: 4.7 と湾口から河川の流入する湾奥に向かって大きくなった。水深毎の平均値は3 m: 2.1, 7 m: 2.7 で季節や地点に比べて変化が小さかった。Fig. 3 に沈降粒子束と $\Delta\sigma_t$ の関係を示した。これを見ると $\Delta\sigma_t$ が大きくなるに従い沈降粒子束は低位に収束する傾向がみられた。特に成層が強くなる8月は他の月に比べて、その傾向が強くなることが確認できる。この結果は、密度成層の強弱により表層生産物の下方へ

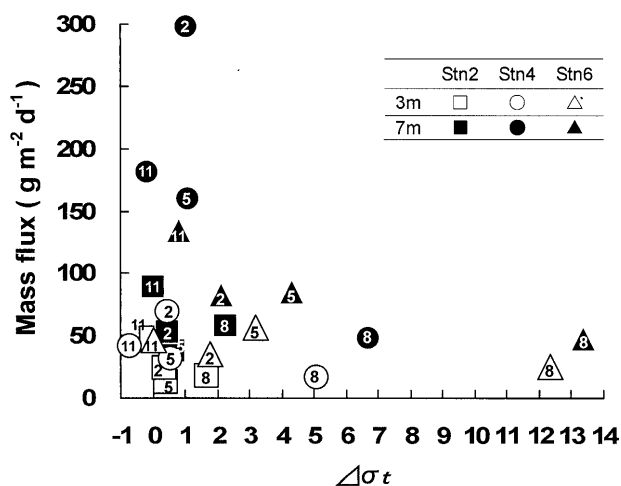


Fig. 3 Relationship between mass flux and stratification intensity ($\Delta\sigma_t$), defined as the difference between σ_t at the surface and water depth of moored sediment traps. Values in symbols indicate the month.

の輸送度合いが決まることを表しており、河川感潮域を有する内湾の特徴の一つと考えられた。

4.2 粒子状物質の生化学的特長

粒子状物質の親生物元素比は粒子の由来や挙動の履歴を表すことが知られている。そこで、懸濁態粒子と沈降粒子の親生物元素比について検討を行った。

懸濁態粒子の親生物元素比 C:N は $5.3 \sim 14.9$ の範囲で、C:N が 10 以上を観測した 97 年 5 月の底層 (2 試料) や 98 年 2 月の Stn. 6 の 2 m 以深 (4 試料) を除くと調査地点間や水深による明確な違いは見られなかった。季節毎の C:N の平均値は 8 月が 6.3 と低い値を示したが、他の季節 (7.4~8.1) と比べて差は無かった。これらの値はレッドフィールド比の C:N=6.6 (Redfield *et al.*, 1963²¹⁾) と近似していたことから、洞海湾に存在する懸濁粒子の主な起源は、周年を通じて動植物プランクトンであると推定された。そこで、植物プランクトンの指標である Chl *a* 濃度と親生物元素 (C, N, P) の相関を調べた。その結果、Chl *a* 濃度と PON 及び PP は周年にわたって有意に相関が認められたが、POC は 8 月と 11 月しか有意でなかった (Table 5)。しかし、前述した C:N が 10 以上の値を除けば、Chl *a* 濃度と POC の相関は有意なことを確認している (5 月, $r=0.587$, $p<0.01$; 2 月, $r=0.408$, $p<0.05$)。以上より、懸濁態粒子の主な起源は植物プランクトンで、調査地点や水深によっては再懸濁した堆積物や陸域由来有機物が一時的に影響を及ぼしていると考えられた。

沈降粒子の親生物元素比 C:N は $7.1 \sim 22.3$ の範囲で、調査地点毎の C:N の平均値を求めると湾口 (12.5) < 湾央 (13.7) < 湾奥 (15.7) の順で大きくなる傾向が見られた (Table 1)。また、季節毎の C:N の平均値は 8 月 (9.8) < 5 月 (13.2) < 11 月 (14.4) < 2 月 (18.5) の順で大きくなった。8 月の C:N=9.8 はレッドフィールド比の C:N=6.6 (Redfield *et al.*, 1963²¹⁾) と比較して若干高い値ではあるが、他の季節に比べ動植物プランクトンを起源とする粒子が多く沈降していると推察された。しかし、Chl *a* 濃度と沈降粒子における親生物元

Table 5 Coefficients of correlation between concentration of Chl *a* and concentrations of POC, PON and PP in all samples from each season. Abbreviations as in Table 3.

	May 1997	Aug 1997	Nov 1997	Feb 1998
POC	0.177	0.865**	0.400*	0.310
PON	0.596**	0.849**	0.669**	0.580**
PP	0.577**	0.818**	0.540**	0.503**

** $p<0.01$

* $p<0.05$

素（C, N, P）含量の関係については相関が認められなかった。

次に粒子状物質の親生物元素比 C:P と N:P の関係から各態粒子の生化学的特長を比較検討した。Fig. 4 より沈降粒子の C:P と N:P は懸濁粒子に比べて大きな値となっていることがわかる。そのため、洞海湾の沈降粒子の起源は、懸濁粒子を主体とした粒子がそのまま沈降しているものもあるが、懸濁粒子が分解されながら鉛直的に沈降して捕集されただけでは、説明できない粒子が付け加わっている可能性が高い。それぞれの粒子状物質の C:P と N:P の相関は高く有意であった（懸濁態粒子： $r=0.80$, $n=132$, $p<0.01$ ；沈降粒子： $r=0.95$, $n=24$, $p<0.01$ ；堆積物： $r=0.99$, $n=7$, $p<0.01$ ）。回帰直線の傾き（±標準誤差）は C:N を表し、懸濁態粒子 $8.2 (\pm 0.35) <$ 沈降粒子 $22 (\pm 1.5) <$ 堆積物 $34 (\pm 1.9)$ の順で大きくなることから、各態粒子の生化学的特性が異なることが判る。また、懸濁態粒子は点線で示したレッドフィールド比の傾き C:N=6.6 と近似していたことから、植物プランクトンを主体とする基礎生産由来の粒子状物質と考えられた。一方、沈降粒子の C:N は 22 で、懸濁粒子と堆積物の中間的な値であった。この結果から、トラップで捕集された粒子は、表層から沈降した C:N の低い基礎生産由来の粒子と分解が進み高い C:N を持つ海底堆積物の再懸濁粒子から構成されることを示していると考えられた。

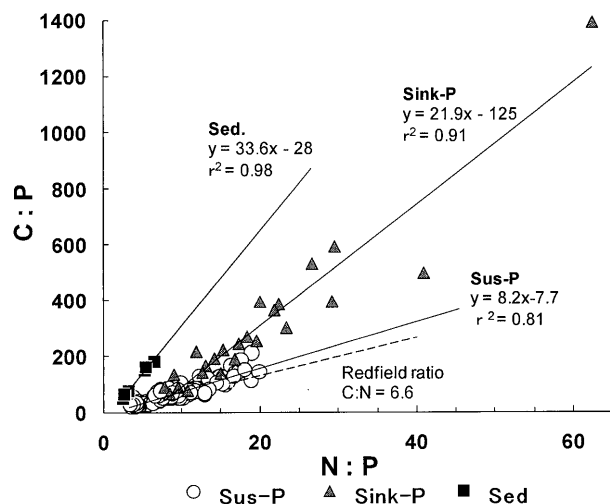


Fig. 4 Relationship between N:P and C:P ratios (mol:mol) of surface sediments (Sed), sinking particles (Sink-P) and suspended particles (Sus-P) in Dokai Bay.

4.3 沈降粒子を構成する水柱中の懸濁粒子と海底堆積物再懸濁物の割合の推定

セディメントトラップで捕集された沈降粒子の多寡や由来について検討したところ、水柱中の懸濁粒子と再懸濁した海底堆積物から構成されていると考えられた。そこで、沈降粒子の有機態炭素や有機態窒素含量に占める懸濁粒子と再懸濁した海底堆積物の割合の推定を試みた。炭素と窒素の挙動が同一と仮定するなら、沈降粒子中の元素含量をエンドメンバーとして炭素と窒素は下記の二つの式として表すことができる。

$$C_{\text{trap}} = \alpha C_{\text{sus}} + \beta C_{\text{sed}} \quad N_{\text{trap}} = \alpha N_{\text{sus}} + \beta N_{\text{sed}}$$

ただし、 $C_{\text{trap}} \cdot N_{\text{trap}}$ は沈降粒子中の炭素・窒素含量、 $C_{\text{sus}} \cdot N_{\text{sus}}$ は懸濁粒子中の炭素・窒素含量、 $C_{\text{sed}} \cdot N_{\text{sed}}$ は海底堆積物の炭素・窒素含量、 α は懸濁粒子係数、 β は海底堆積物係数とする。はじめに上記の二次式を解いて α と β を求めて、沈降粒子中の懸濁粒子由来のものと再懸濁した海底堆積物由来の割合を計算した。なお、懸濁粒子の炭素・窒素含量はトラップ設置深度直上の 2 m 及び 6 m の値を使用した。

Fig. 5 にトラップで捕集された粒子状物質の有機態炭素・窒素含量に占める懸濁物と堆積物の割合を示した。実際、トラップで捕集された粒子状物質の一部は一定程度分解の進んだ物質と考えられるが、前述の式ではその程度は考慮していない。懸濁物質は堆積物に比べて分解が進みやすいことを勘案すれば、Fig. 5 は堆積物の寄与を最大に、懸濁物の寄与を最小に評価した結果と考えられる。その結果、有機態炭素は懸濁物由来が平均値で約 35%、海底堆積物由来が平均で約 65% と推定された。一方、有機態窒素は懸濁物質由来が平均で約 60%、残りの約 40% が海底堆積物由来と考えられた。水深毎に見た懸濁物由来の有機態炭素の構成割合は 3 m 層の平均値が 41%、7 m 層の平均値が 30% であったが、有機態窒素は 3 m 層で平均値が 67%、7 m 層の平均値は 54% であった。次に、有機態炭素における構成割合の季節変化を見ると、夏季は懸濁物由来が平均で約 55% と高かったが、冬季は平均で約 16% と低くなった。有機態窒素の構成割合の季節変化についても、懸濁物由来の割合は夏季に平均値で約 81% と高く、冬季に平均値で約 34% と低くなる傾向を示した。この結果から、夏季は成層状態のため海底堆積物の再懸濁の影響が小さいが、それ以外の季節は、循環期で海水の上下混合が活発になるため海底堆積物の割合が大きくなることを反映していると考えられた。また、沈降粒子束が $297 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と最も高い値を示した 2 月の Stn. 4、7 m 層は有機態炭素中の海底堆積物の割合は 95% で C:N も 22.3 と高かったことから海底堆積物の再懸濁が及ぼす影響の大きいことがわかる。

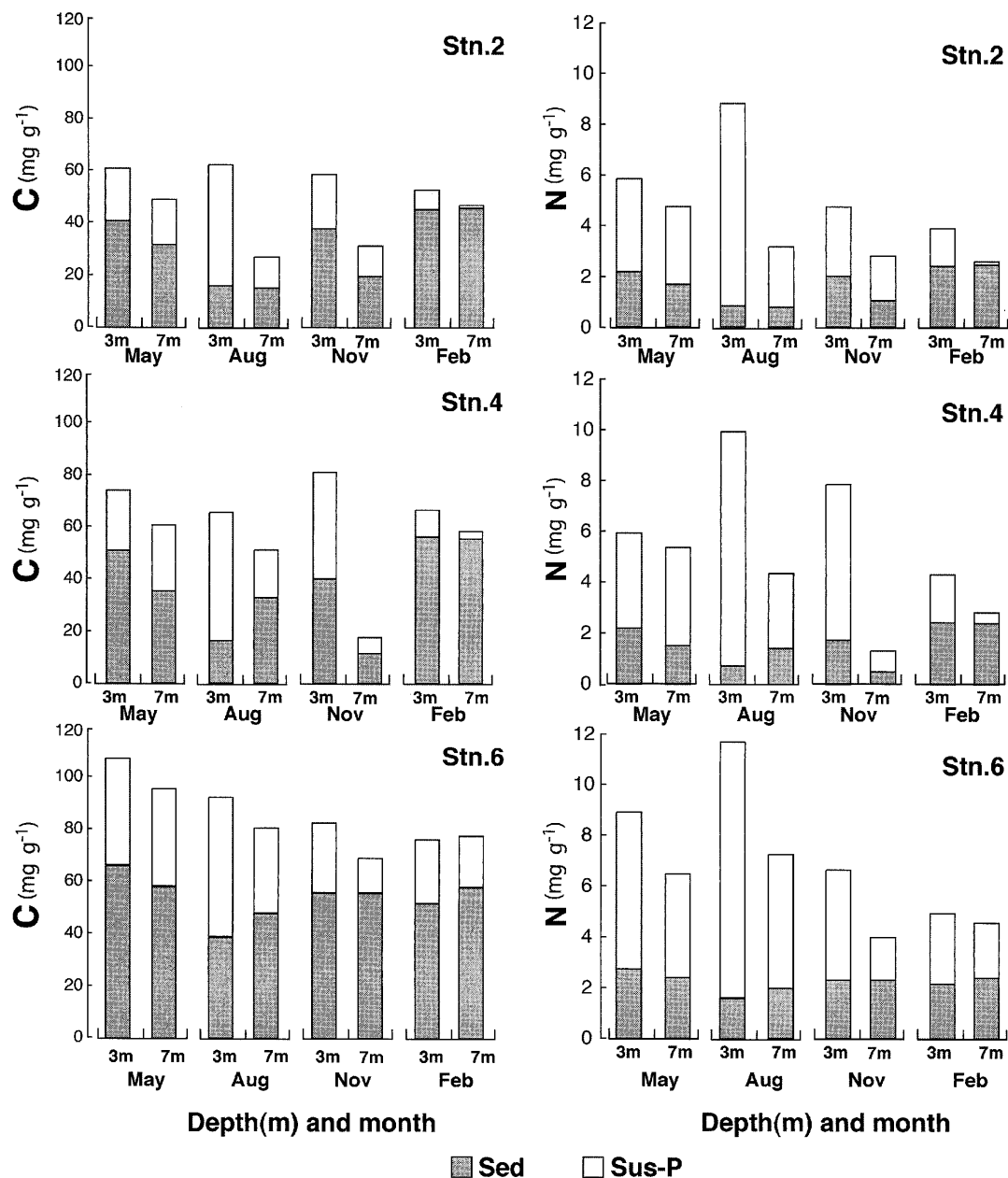


Fig. 5 The proportions of organic carbon and nitrogen in sinking particles originating from suspended particulate matter (Sus-P) and resuspended surface sediment (Sed) in Dokai Bay.

4.4 粒子状物質の鉛直フラックスの検討

洞海湾における炭素フラックスの調査の多くは、夏季の低次生産過程に焦点をあてたもので以下の3点が明らかとなっている。①夏季（7～9月）に発生する赤潮は年間の基礎生産量（ $180 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ）の65%に相当すること（Tada *et al.*, 2001²²⁾），②夏季洞海湾のプランクトン生態系における炭素フラックスは一次生産から二次生産への転送効率が28%と高くネット動物プランクトンが植物プランクトンの摂食者として重要なこと（Uye *et al.*, 1998²³⁾），③洞海湾の有機態炭素フラックスが大

きいため、コペポダのフィーカルペレット炭素フラックスの寄与が低くなること（濱田ほか, 2008²⁴⁾）等が指摘されている。

本調査結果を概観し、沈降粒子の有機態炭素フラックスと水柱中の懸濁態有機炭素現存量（以後はSTS-POCとする）を比較すると、夏季以外の調査では水柱中の現存量以上の有機態炭素フラックスが多く観測されている（Table 6）。この結果は、4.3で示した海底堆積物の再懸濁物が捕集されている可能性や濱田ほか（2008）²⁴⁾が指摘した有機態炭素に富んだ有機物が陸域から負荷され

ていることを示すものと思われた。このため、炭素を指標として鉛直フラックスの季節変化を検討するには、少なくとも再懸濁物の影響を除いた値について粒子状物質を起源毎に区別し検討する必要があると判断した。そこで、前述4.3で求めた懸濁粒子由来有機態炭素のフラックス（以後は SPM-CF とする）のみを検討の対象とした。SPM-CF は Chl *a* を指標とした植物プランクトン由来炭素フラックス（以後は Phyt-CF とする）と SPM-CF から Phyt-CF を除いた残りの有機態炭素フラックス（以後は R-CF とする）の二つに区別して評価を試みた。Phyt-CF の推定には、1996年の夏季調査（濱田ほか、2008²⁴⁾）で求められた Chl *a* から植物プランクトン由来炭素への換算係数（C:Chl *a* = 36）を使用した。植物プランクトン由来の有機態炭素は Phaeo 含量も検討することでより正確な評価が可能となるが、沈降粒子以外の粒子状物質の Phaeo 含量を調べていないので本研究では検討の対象としなかった。そのため、Phyt-CF は過小評価になるので、ここで述べる Phyt-CF は最小値となる。また、Phyt-CF を除いた R-CF は、分解過程にある基礎生産由来有機物や陸域から負荷された有機物等から構成されると仮定する。

はじめに、有機態炭素を指標としてトラップの設置水深以浅の STS-POC から、SPM-CF として沈降除去されている割合を求め比較を行った（Table 6）。トラップ設置深度 7 m までの STS-POC を比較すると、夏季の平均

値は 8.24 g m^{-2} で他の季節の平均値 $3.37 \sim 4.20 \text{ g m}^{-2}$ に比べて高かった。STS-POC の地点間の平均値を比較すると Stn. 2 (3.83 g m^{-2}) < Stn. 4 (5.19 g m^{-2}) < Stn. 6 (5.97 g m^{-2}) の順に湾奥部で大きくなる傾向が見られた。STS-POC から SPM-CF として水柱から除去される割合を季節毎の平均値で比較すると、100%を超えた一部の試料を除けば 8月 (17%) < 2月 (25%) < 11月 (47%)・5月 (48%) の順に大きくなり、成層期と循環期で除去率が異なることが判った。そのため、有機態炭素を指標として水柱中の現存量と沈降除去量を検討したところ、以下の3パターンに分けられた。(1)現存量は多いが成層期のためフラックスは小さい(夏季)。(2)現存量は多くないが循環期のためフラックスは大きい(春季・秋季)。(3)循環期だが沈降除去率が小さいためフラックスも小さい(冬季)。また、除去率が100%を超える地点の存在は、堆積物の再懸濁だけでなく陸域から有機態炭素に富んだ粒子の突発的な負荷を示すものと考えられた。次に、SPM-CF に占める Phyt-CF と R-CF の割合の変化について検討した (Table 6)。平均すると Phyt-CF は23%、R-CF は77%を占めていた。Phyt-CF の割合

Table 6 Standing stock of POC (STS-POC) and the carbon flux originating from suspended particulate organic matter (SPM-CF), that originating from phytoplankton (Phyt-CF) and the remaining organic matter (R-CF). The value of SPM-CF was taken from Figure 5.

Date	Stn.	Depth (m)	C flux ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	STS-POC (g m^{-2})	SPM-CF ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	Phyt-CF ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	R-CF ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	SPM-CF / STS-POC (%)	Phyt-CF / SPM-CF (%)	R-CF / SPM-CF (%)
May 1997	2	3	0.77	2.06	0.25	0.23	0.03	12.4	90.0	10.0
		7	1.88	4.26	0.65	0.16	0.50	15.4	23.8	76.2
	4	3	2.32	1.98	0.72	0.30	0.42	36.4	42.1	57.9
		7	9.80	4.57	4.08	0.29	3.79	89.3	7.2	92.8
	6	3	6.07	1.91	2.32	0.22	2.10	122	9.5	90.5
		7	8.11	3.76	3.16	0.22	2.94	84.1	7.0	93.0
Aug 1997	2	3	1.08	3.84	0.80	0.07	0.74	20.9	8.3	91.7
		7	1.58	6.80	0.69	0.09	0.60	10.2	13.2	86.8
	4	3	1.12	5.66	0.84	0.08	0.76	14.8	9.8	90.2
		7	2.46	9.68	0.88	0.08	0.80	9.0	8.6	91.4
	6	3	2.34	4.97	1.35	0.12	1.23	27.3	8.9	91.1
		7	3.79	8.24	1.53	0.08	1.45	18.5	5.1	94.9
Nov 1997	2	3	2.80	0.93	1.00	0.15	0.84	107	15.3	84.7
		7	3.01	2.11	1.23	0.13	1.10	58.2	10.3	89.7
	4	3	3.37	1.34	1.70	0.80	0.90	127	47.1	52.9
		7	3.25	3.00	1.13	0.37	0.75	37.5	33.2	66.8
	6	3	3.83	2.13	1.24	0.27	0.97	58.2	21.5	78.5
		7	9.21	4.99	1.74	0.33	1.40	34.8	19.2	80.8
Feb 1998	2	3	1.29	0.92	0.18	0.04	0.14	20.0	22.8	77.2
		7	2.48	2.16	0.04	0.04	0.01	2.1	87.0	13.0
	4	3	4.65	1.58	0.71	0.19	0.53	45.2	26.1	73.9
		7	17.6	3.50	0.91	0.13	0.78	25.9	14.0	86.0
	6	3	2.69	2.51	0.86	0.04	0.81	34.1	4.7	95.3
		7	6.42	6.90	1.63	0.09	1.54	23.6	5.4	94.6

Table 7 Comparison of chlorophyll *a* flux and standing stock.

Date	Stn.	Depth (m)	Flux ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	Standing Stock (mg m^{-2})	Flux / Stock (%)
May 1997	2	3	6.36	57.5	11.1
		7	4.32	107.9	4.0
	4	3	8.43	32.2	26.2
		7	8.14	81.3	10.0
	6	3	6.12	25.9	23.6
		7	6.13	31.4	19.5
Aug 1997	2	3	1.85	229	0.8
		7	2.54	344	0.7
	4	3	2.28	284	0.8
		7	2.09	435	0.5
	6	3	3.37	192	1.8
		7	2.18	246	0.9
Nov 1997	2	3	4.23	3.9	107
		7	3.53	9.2	38.4
	4	3	22.2	19.4	115
		7	10.4	30.5	34.0
	6	3	7.40	17.7	41.8
		7	9.29	34.4	27.0
Feb 1998	2	3	1.17	17.1	6.8
		7	1.07	35.1	3.0
	4	3	5.17	46.1	11.2
		7	3.52	87.6	4.0
	6	3	1.12	24.3	4.6
		7	2.46	58.3	4.2

を季節毎に比較すると8月は9%で他の季節の25~30%より低かった。また、調査地点毎の平均値は湾奥(Stn. 6; 10%) < 湾央(Stn. 4; 24%) < 湾口(Stn. 2; 34%)の順に大きくなった。これらの結果から、基礎生産が鉛直輸送過程に及ぼす影響は成層度の時空間変化に左右されることが予想された。

そこで、Chl *a* を指標として植物プランクトンの現存量と鉛直フラックスの関係について検討した(Table 7)。トラップ設置深度7 m までの Chl *a* 現存量の平均値を比較すると、11月 (24.7 mg m^{-2}) < 2月 (67.2 mg m^{-2}) < 5月 (73.5 mg m^{-2}) < 8月 (342 mg m^{-2}) の順で夏季に最大となった。地点間の平均値を比較すると、湾奥 Stn. 6 が 92.5 mg m^{-2} で他の地点124~159 mg m^{-2} に比べて若干低い傾向であった。水柱中の Chl *a* 現存量と Chl *a* フラックスとしてトラップに捕集された割合の平均値を比較すると8月 (0.9%) < 2月 (5.7%) < 5月 (15.7%) < 11月 (60.5%) の順に大きくなった。この結果は、前述した STS-POC から SPM-CF として沈降除去される割合の季節変化と整合的であった。以上より植物プランクトン由来粒子の現存量とフラックスの季節変化を比較すると、現存量は秋季 < 冬季 < 春季 < 夏季の順で大きくなるが、フラックスは冬季 < 夏季 < 春季 < 秋季の順で大きくなり季節変化は一致しない。一方、海水の動きに注目すると夏季は密度成層が形成され鉛直的な動きは緩やかだが、他の季節は循環期のため海水の上下運動が活発となる。そのため植物プランクトン由来粒子の鉛直フラックスは水柱中の現存量と海水の上下混合

の程度によって決まると考えられた (Fig. 6)。

本研究では有機態炭素を指標として粒子状物質の鉛直輸送過程を議論したが、有機態炭素フラックスと有機態窒素フラックスや全リンフラックスの調査毎の平均値を比較すると、最高値を示した季節が違う(有機態炭素は冬季(2月)、有機態窒素・全リンは春季(5月))ことから、窒素やリンの挙動は本研究結果と異なることが予想される。今後は、窒素やリンの鉛直フラックスについても解析を行い過栄養内湾における親生物元素フラックスの全体像を明らかにしたい。

謝 辞

本研究を行うにあたり、観測の実施や試料の測定にご助力いただいた香川大学農学部海洋環境学研究室の学生諸氏に感謝いたします。また、観測の実施にご協力いただいた北九州市環境科学研究所の皆様へ深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 柳哲雄 (1991): 東京湾の物質輸送過程. 月刊海洋, **23**, 175-177.
- 2) 乗木新一郎・嶋本晶文・角皆静男 (1994): 東京湾におけるリンとケイ素の沈降粒子束と循環. 地球化学, **28**, 15-20.
- 3) 門谷茂 (1993): 粒子の生化学的キャラクタリゼーションから見た物質輸送過程. 月刊海洋, **25**, 40-45.
- 4) 佐々木克之 (1991): プランクトン生態系と窒素・リン循環. 沿岸海洋研究ノート, **28**, 129-139.
- 5) Montani, S., Y. Mishima and T. Okaichi (1991): Scavenging process of marine particles in Osaka Bay. Marine Pollution Bulletin, **23**, 107-111.
- 6) 清水徹・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, **18**, 304-313.
- 7) 梶原葉子・山田真知子 (1997): 洞海湾における付着生物の出現特性と富栄養度の判定. 水環境学会誌, **20**, 185-192.
- 8) 東輝明・山田真知子・門谷茂・広谷純・柳哲雄 (1988): 過栄養な内湾洞海湾における貧酸素水塊の形成過程とその特徴について. 日本水産学会誌, **64**, 204-210.
- 9) Montani, S., K. Tada and T. Okaichi (1988): Purine and pyrimidine base in marine particles in the Seto Inland Sea, Japan. Marine Chemistry, **25**, 359-371.
- 10) Menzel, D. W. and N. Cowin (1965): The measurement of total phosphorus in seawater based on the liberation of organically bound fractions by persulfate oxidation. Limnology and Oceanography, **10**, 280-282.
- 11) Murphy, J. and J. P. Riley (1962): A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta, **27**, 31-36.
- 12) Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990): An improved method for determination of phytoplankton chlorophyll using *N,N*-dimethylformamide. Journal of Oceanographical Society of Japan, **46**, 190-194.

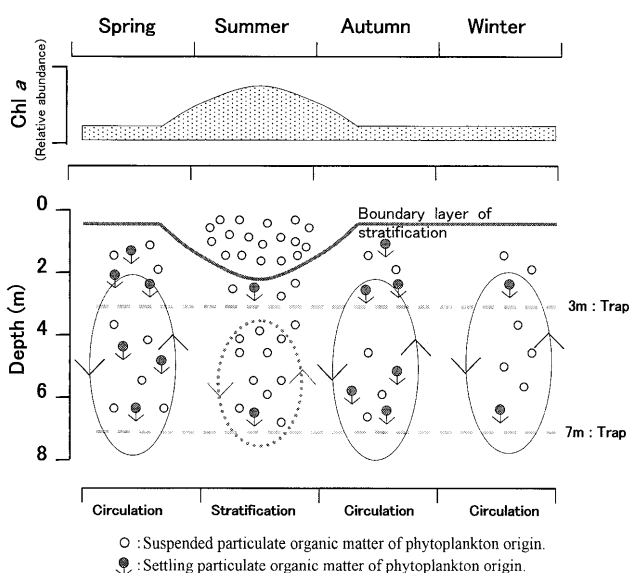


Fig. 6 Representation of seasonal changes in the vertical flux of particulate organic matter originating as phytoplankton in Dokai Bay.

過栄養内湾（洞海湾）における粒子状物質の生化学的特徴と鉛直輸送過程の季節変化

- 13) Lorenzen, C. J. (1967) : Determination of chlorophyll and pheopigments : spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*, **12**, 343-346.
- 14) Hedges, I. J., W. A. Clark and G. L. Cowie (1988) : Fluxes and reactivities of organic matter in a coastal marine bay. *Limnology and Oceanography*, **33**, 1137-1152.
- 15) Sigleo, A. C. and D. J. Shultz (1993) : Amino Acid Composition of Suspended Particles, Sediment-Trap Material, and Benthic Sediment in the Potomac Estuary. *Estuaries*, **16**, 405-415.
- 16) Taguchi, S. (1982) : Sedimentation of newly produced particulate organic matter in a subtropical inlet, Kaneohe Bay, Hawaii. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **14**, 533-544.
- 17) 佐々木克之・下田徹・松川康夫 (1999) : 貧酸素に関わる物質循環と負荷量削減試算. *月刊海洋*, **31**, 515-523.
- 18) Tsutsumi, H., S. Srithongouthai, A. Inoue, A. Sato and D. Hama (2006) : Seasonal fluctuations in the flux of particulate organic matter discharged from net pens for fish farming. *Fisheries Science*, **72**, 119-127.
- 19) 山田真知子・梶原葉子 (2004) : 著しく富栄養化の進行した洞海湾の植物プランクトン出現特性. *海の研究*, **13**, 281-293.
- 20) 武岡英隆 (1985) : 瀬戸内海の密度成層. *海と空*, **60**, 145-152.
- 21) Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards (1963) : The influence of organisms on the composition of sea water. p. 26-77. In, *The Sea*, Vol. 2, edited by M. N. Hill. Wiley-Inter-science., New York.
- 22) Tada, K., M. Morishita, K. Hamada, S. Montani and M. Yamada (2001) : Standing stock and production rate of phytoplankton and red tide outbreak in heavily eutrophic embayment, Dokai Bay, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, **42**, 1117-1186.
- 23) Uye, S., N. Nagano and T. Shimazu (1998) : Biomass, production and trophic roles of micro- and net-zooplankton in Dokai Inlet, a heavily eutrophic inlet, in summer. *Plankton Biology and Ecology*, **45**, 171-182.
- 24) 濱田建一郎・上田直子・山田真知子・多田邦尚・門谷茂 (2008) : 夏季の過栄養内湾における生化学的キャラクターから見た粒子状物質の起源と低次生産過程. *海の研究*, **17**, 179-191.