

— 論 文 —

夏季の過栄養内湾 (洞海湾) 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*

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

要 旨

夏季の過栄養内湾 (洞海湾) の物質循環過程に及ぼす低次生産過程の影響を明らかにするために、粒子状物質の生化学的特徴を調べた。調査は赤潮が発生している 1995 年 8 月と 1996 年 8 月にセディメントトラップを湾内の 3 箇所に設置して沈降粒子の捕集を行った。

湾内における沈降粒子束は $8.2 \sim 307 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と瀬戸内海など他の海域で得られている値より全般的に高かった。また沈降粒子束は湾口 (Stn. 2, $20.1 \sim 62.5 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) より湾奥 (Stn. 6, $41.8 \sim 307 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) の方が大きく、各定点とも水深 3 m より 7 m の方が大きい傾向が見られた。粒子状物質の親生物元素組成比を見ると、湾口から湾奥の沈降粒子 (1996 年 Stn. 2, 3m C : N : P = 68 : 10 : 1, Stn. 4, 3 m C : N : P = 71 : 10 : 1) と懸濁粒子 (1996 年 C : N : P = 57 : 12 : 1) は近似していた。また、沈降粒子の有機態炭素フラックスに占める植物プランクトン由来有機態炭素フラックスやフィーカルペレット態有機態炭素フラックスの割合は湾口に行くに従い大きくなることが確認された。湾奥で得られた粒子状物質の親生物元素組成比を見ると、沈降粒子の C/N (11~21) が懸濁粒子の C/N (4.6) やレッドフィールド比 (6.6) に比べ高いため、陸域由来の粒子状物質の影響を受けていると考えられた。これらの結果から、湾内における粒子状物質の由来や物質循環過程は空間的に大きく異なり、湾口から湾奥にかけては低次生産過程が寄与しているが湾奥は陸域の影響を受けていることが示唆された。

キーワード：洞海湾，過栄養内湾，沈降粒子，有機態炭素，低次生産過程

1. はじめに

沿岸海域に存在する有機物には、主に植物プランクトンの光合成によって生成された有機物と河川を通して陸から運ばれる有機物がある。粒子状の形態を持つ有機物は、その起源により水柱中での循環過程における挙動が異なるため、湾内における堆積や湾外への輸送に時空間的な相違が生じると考えられる。そのため、湾内における物質の循環や輸送過程を考える際には、粒子状有機物の化学的性質や分布を明らかにすることは

* 2007 年 4 月 10 日 受領；2008 年 2 月 4 日 受理
著作権：日本海洋学会，2008

[†] 北九州市立大学アクア研究センター；
〒 808-0135 北九州市若松区ひびきの 1-1
主著者 e-mail address : k-hamada@env.kitakyu-u.ac.jp

[‡] 北海道大学大学院環境科学院；
〒 060-0810 札幌市北区北十条西 5 丁目

^{**} 福岡女子大学人間環境学部；
〒 813-8529 福岡市東区香住ヶ丘 1-1-1

^{††} 香川大学農学部；
〒 761-0795 香川県木田郡三木町池戸

必要不可欠である。

日本沿岸域の粒子状物質の動態に関する研究の多くは、富栄養化した閉鎖性内湾でなされている。東京湾で行われた物質循環に関する研究(門谷, 1991)によると、湾内の粒子状有機物の生化学的性状から、一次生産由来の懸濁態有機炭素量は、陸上からの負荷量の10倍に相当することや水柱内の再循環過程により海底に到達して堆積・埋没する量はわずかであることを明らかにし、粒子状有機物の物質循環過程における重要性を指摘している。柳(1991)は、その規模や陸上からの栄養塩類負荷量がほぼ等しい東京湾と大阪湾の窒素滞留時間の相違の要因の一つとして粒子状有機物の生成・消滅過程の重要性を示唆している。沿岸海域における物質輸送を支配する基本的な過程を明らかにし、理解を深めるには多くの沿岸海域で物質輸送に関わる物理・化学・生物全ての過程の定量的な調査が必要だが、閉鎖性が強く東京湾や大阪湾より高度に富栄養化した内湾からの粒子状物質の生化学的特徴やその動態についての報告例は無い。

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閉鎖性の強い内湾である。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。しかし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が、湾奥部表層のDINとDIPの年平均値はそれぞれ760 μM 、5.6 μM と高く、夏季には湾奥表層で赤潮や貧酸素水塊が発生する過栄養状態(梶原・山田, 1997; 東ら, 1998)にあることが明らかとなっている。過栄養状態の内湾では植物プランクトンを起源とする粒子状物質が多量に存在するため、水柱内の低次生産を主体とする粒子状有機物の生成・輸送過程は、対象とする内湾の富栄養状態や海洋構造によって異なると考えられ、海域特性の一要因として重要である。本研究では、赤潮や貧酸素水塊の形成が頻繁に観測されている夏季の洞海湾において、トランセクト調査と同時にセディメントトラップによる粒子状物質の捕集を行い、湾内に存在する粒子状物質の分布や生化学的特徴を調べた。また、捕集された粒子状物質の顕微鏡観察を行

い、動物プランクトン排泄物の定量を試みた。そして、水柱中の粒子状物質の有機態炭素に注目して、粒子状物質の由来を推定し、低次生産過程が湾内の物質輸送へ及ぼす影響について考察した。

2. 方法

2.1. 観測と試料の採取

洞海湾内の湾口から湾奥までに設けたStn. 1~7の7地点(Fig. 1)で1995年8月31日~9月1日、1996年8月21日~8月22日の2回にわたって、海洋観測と懸濁粒子や沈降粒子の採取を行った。海洋観測はSTDOメータ(アレック電子ADR1000)を使用して各地点において水温、塩分、DOの測定を表層から1 m毎に底層1 m直上まで行った。沈降粒子の捕集にはM型セディメントトラップ(Montani *et al.*, 1988)をFig. 2に示すように水深3 m・7 mに設置し24時間垂下して捕集を試みた。1995年の沈降粒子の捕集は湾口のStn. 2、湾奥のStn. 4の2地点で、また、1996年はStn. 2, Stn. 4, 及び湾奥のStn. 6の3地点で行った。海水中の懸濁粒子の採取は5 L バンドン採水器を用いて2 m 毎に行った。

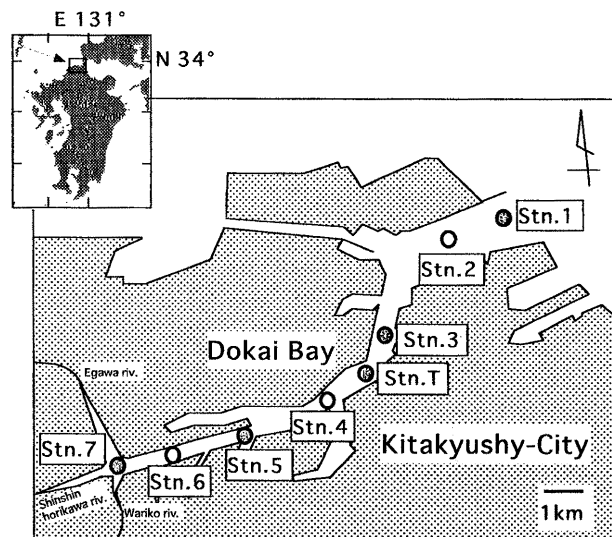


Fig. 1. Study area and location of the observation stations. ○: Observation with mooring sediment trap station. ●: Observation without mooring sediment traps station.

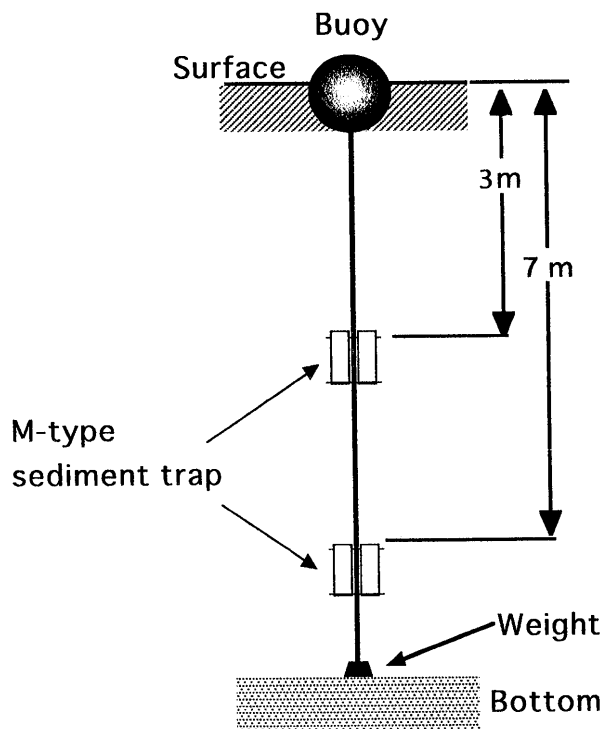


Fig. 2. Illustration of sediment trap system.

2.2. 懸濁粒子と沈降粒子中に含まれる親生物元素とクロロフィルの分析

懸濁粒子は、予め 450 °C 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 °C 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トラップを垂下した時間とトラップ筒の底面積から沈降粒子束を算出した。

サンプル中の有機態炭素・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) を使用して定量した。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, 1965) した後、モリブデンブルー法(Murphy and Riley, 1962) で測定した。

懸濁粒子中の Chlorophyll *a* 含有量(以下 Chl *a*) は一定量の海水試料を Whatman GF/F フィルターを用いて吸引ろ過し、このフィルターをネジ口付試験管に移した後、直ちにジメチルホルムアミド 5 ml を加え、分析まで -20 °C で冷凍保管(Suzuki and Ishimaru, 1997) した。Chl *a* の測定は、試料を遠心分離後、上澄液を Persons *et al.* (1984) に記載されている Lorenzen (1967) の方法により行った。沈降粒子中の Chl *a* はトラップを回収後、静置した後に上澄液を除去し恒量にした Whatman GF/F フィルター上に集め、直ちにジメチルホルムアミドを加え -20 °C で冷凍保管した後、懸濁粒子と同様の方法で測定した。

2.3. フィーカルペレットの測定

フィーカルペレットは、1996 年の調査で捕集された沈降粒子試料中に含まれる多様な粒子状物のうち、Hiromi *et al.* (1988) の方法を参考にして、光学顕微鏡下でコペポーダのフィーカルペレットと判断されるものについてのみ計数を行うとともに、接眼マイクロメータでフィーカルペレットの長径と短径を計測した。計測にあたっては、形状のはっきりした楕円形や円柱状の粒子だけでなく、崩壊したものであっても、その形状からフィーカルペレットと判別できるものについては計測を行った。フィーカルペレットフラックスは沈降粒子束と同様に、得られたフィーカルペレット数とトラップの垂下時間・底面積より算出した。また、フィーカルペレット態の有機態炭素フラックスは、フィーカルペレットを円柱状とみなし体積を求めた後、Gonzalez and Semetcek (1994) のコペポーダのフィーカルペレット体積当たり有機態炭素濃度 ($0.057 \times 10^{-9} \text{ mgC } \mu\text{m}^{-3}$) を用いて算出した。

3. 結果

3.1. 物理化学環境

1995 年 8 月 31~9 月 1 日の湾内の水温は 28.8~30.4 °C で最高値と最低値の差が小さかった。塩分は 21.0~31.2 で、河川が流入している湾奥部の Stn. 7 の 0 m 層で 21.0 と最も低く、Stn. 5~Stn. 7 の水深 1~2 m に

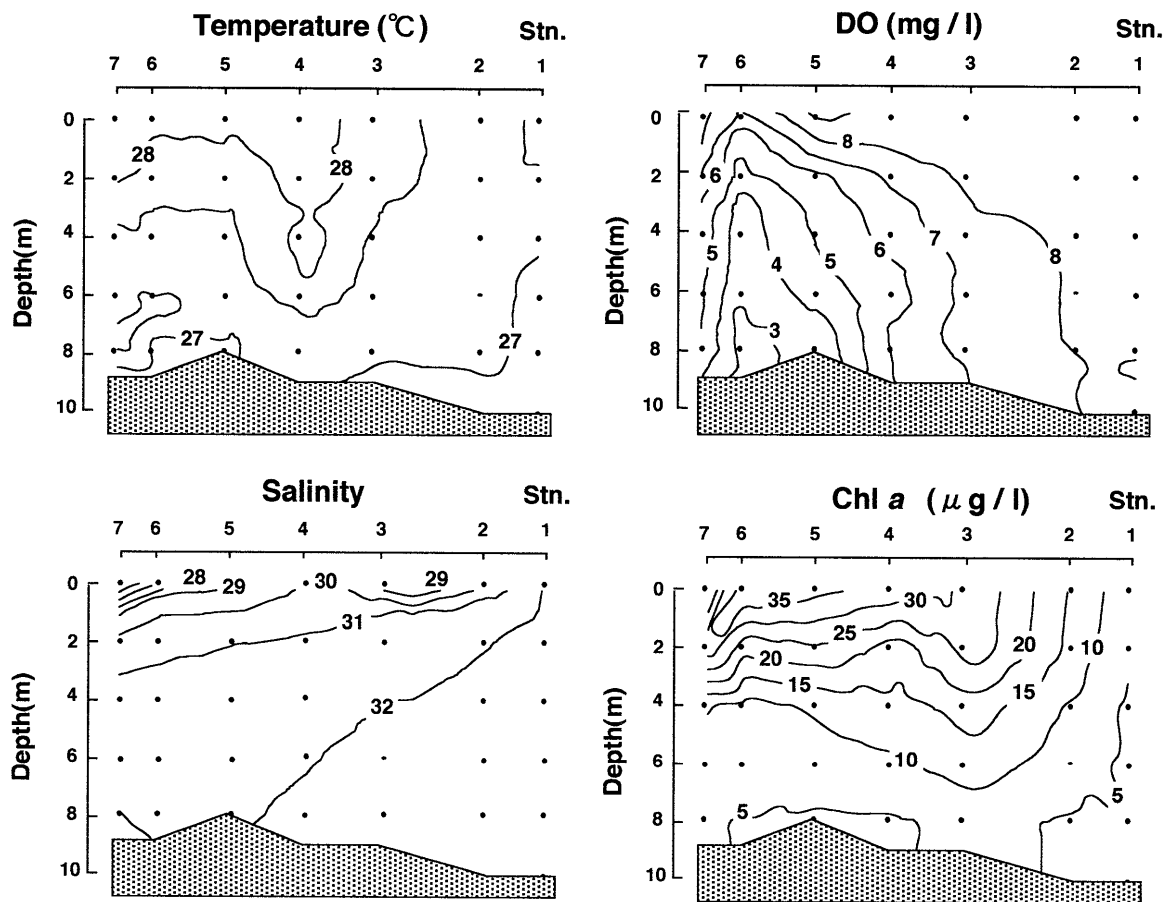


Fig. 3. Vertical and horizontal distribution of water temperature, salinity, dissolved oxygen (DO) and chlorophyll *a* (Chl *a*) of Dokai Bay in 21 August 1996.

かけて塩分層が形成されていた。一方、水深3 m以上の塩分は外海水の底層への差込の影響を受け29以上と高く、Stn. 6の水深9 mで31.2と最も高かった。DOは $0.5 \sim 7.2 \text{ mg L}^{-1}$ で、湾口部Stn. 1の表層で最も高い値 7.2 mg L^{-1} を示したが、湾奥部のStn. 6の水深9 mで 0.5 mg L^{-1} と最も低く、Stn. 4の底層からStn. 7の中層以深にかけて 2 mg L^{-1} 以下の貧酸素水塊が存在していた。Chl *a*は $0.80 \sim 25.1 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ で、湾奥部Stn. 7の表層で $25.1 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ と最も高く、湾口部Stn. 1の6 m層で $0.80 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ と最も低く、湾口底層から湾奥部表層にかけて値が高くなる傾向が見られた。また、1996年8月21日～8月22日の観測結果は、水温は $26.2 \sim 28.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、塩分は $25.9 \sim 33.1$ 、DOは $1.9 \sim 9.3 \text{ mg L}^{-1}$ 、Chl *a*は $2.94 \sim 40.1 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ であった。

1996年の各測定項目の鉛直分布は、1995年観測時と同様の傾向が見られた。夏季の典型的な海洋構造の例として1996年8月21日の水温、塩分、DO、Chl *a*の鉛直分布をFig. 3に示す。

1995年、1996年ともに調査期間中の湾奥(Stn. 5～7)表層は低塩分・高Chl *a*濃度、下層は貧酸素状態にあった。しかし、湾口は外海水の影響を受け湾奥部に比べ高塩分、低Chl *a*濃度で、DOも常に 7 mg L^{-1} 以上であった。以上、見てきたように湾口と湾奥の調査地点は距離にして約7 kmしか離れていないが、その物理化学環境は大きく異なっており、洞海湾は極めて環境傾度が強い海であることがわかる。

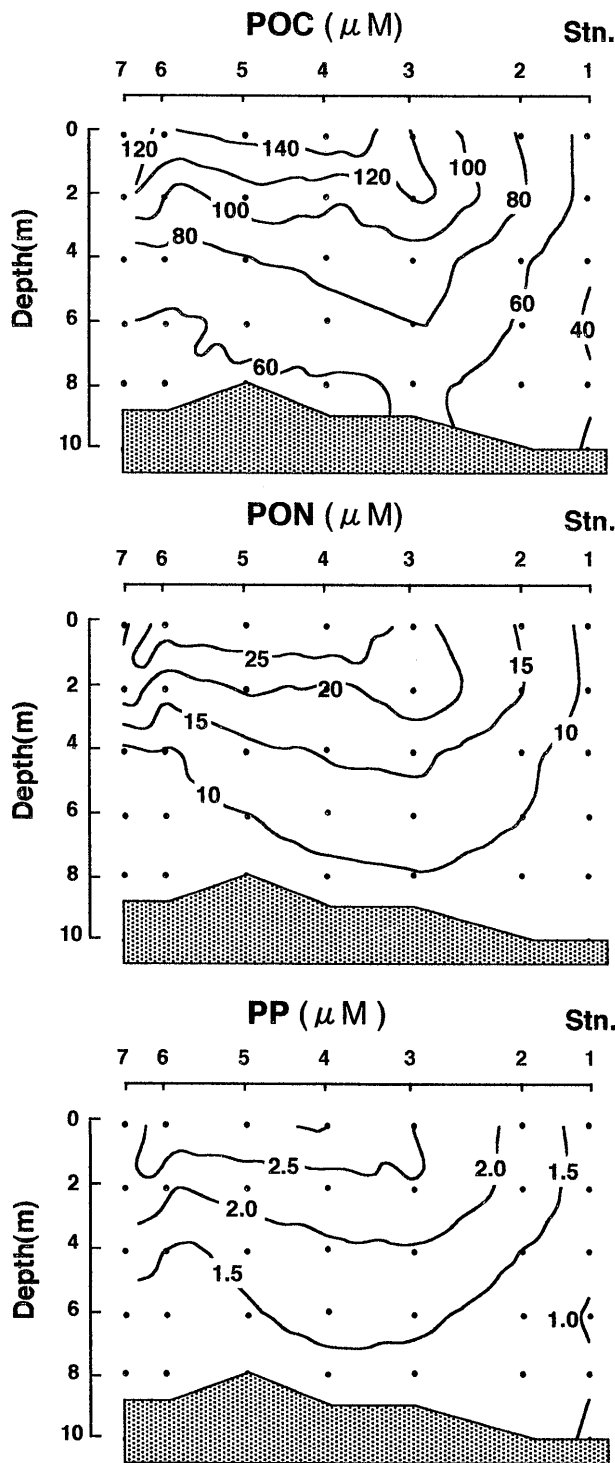


Fig. 4. Vertical and horizontal distribution of particulate of organic carbon (POC), particulate of organic nitrogen (PON) and particulate of phosphorus (PP) of Dokai Bay in 21 August 1996.

3.2. 懸濁粒子中の有機態炭素・有機態窒素・全リン濃度とその鉛直分布

1995年8月31日の懸濁粒子中の粒状有機態炭素(POC)濃度は $37.0\sim 139\ \mu\text{M}$ で、湾奥部のStn. 5の表層で $139\ \mu\text{M}$ と最も高く、湾口部に向かって低くなりStn. 1の0 m層で最低値 $37.0\ \mu\text{M}$ を示した。また、POC濃度は湾中央部の中層以浅から湾奥部表層にかけて $100\ \mu\text{M}$ 以上の高い値を示した。粒状有機態窒素(PON)濃度は $5.0\sim 27.5\ \mu\text{M}$ で湾奥部のStn. 7の表層で $27.5\ \mu\text{M}$ と最高値を示し、湾口部に向かって低くなりStn. 1の表層で $5.0\ \mu\text{M}$ と最も低い値を示し、POCと同様な分布傾向が見られた。粒状全リン(PP)濃度は $0.74\sim 2.50\ \mu\text{M}$ で、湾奥部Stn. 7の表層で $2.50\ \mu\text{M}$ と最も高く、湾口部下層に向かって低くなる傾向が見られStn. 1の水深10 mで最低値 $0.74\ \mu\text{M}$ を示した。1996年8月21日の観測時のPOC濃度は $37.0\sim 160\ \mu\text{M}$ 、PON濃度は $6.1\sim 30.4\ \mu\text{M}$ 、PP濃度は $0.92\sim 3.87\ \mu\text{M}$ であった。Fig. 4に1996年8月21日のPOC・PON・PPの鉛直分布を示す。1996年の各物質濃度は1995年の調査結果と同様に湾口下層で最も低く、湾中央から湾奥部の表層で最高値を示す傾向が見られた。

3.3. 沈降粒子の有機態炭素・有機態窒素・全リン濃度と粒子束

セディメントトラップを設置した各地点の水深3 m及び7 mで得られた沈降粒子中の有機態炭素・有機態窒素・全リン濃度をTable 1に示した。1995年の沈降粒子中の有機態炭素濃度は、 $61.8\sim 99.5\ \text{mg g}^{-1}$ 、有機態窒素濃度は、 $7.11\sim 8.60\ \text{mg g}^{-1}$ 、全リン濃度は、 $0.73\sim 1.71\ \text{mg g}^{-1}$ であった。また、1996年の有機態炭素濃度は、 $33.5\sim 83.5\ \text{mg g}^{-1}$ 、有機態窒素濃度は、 $4.12\sim 8.96\ \text{mg g}^{-1}$ 、全リン濃度は、 $0.37\sim 1.96\ \text{mg g}^{-1}$ であった。1995年のStn. 6で得られた有機態窒素濃度と、1996年のStn. 6で得られた有機態炭素濃度を除けば各成分ともに水深3 mより水深7 mで得られた値の方が低い傾向が見られた。

次に各地点で得られた沈降粒子束と沈降粒子中の有機態炭素・有機態窒素・全リンの各粒子束をTable 2に示した。1995年の2地点の沈降粒子束は、 $8.2\sim 72.4$

Table 1. Organic matter contents in sinking particles at each station of Dokai Bay.

Date	Station	Depth (m)	Contents (mg g ⁻¹)				Atomic ratio		
			C	N	P	Chl <i>a</i>	C/N	C/P	N/P
August 1995	4	3	80.4	8.60	1.71	–	11.0	122	11.1
		7	61.8	7.11	0.77	–	10.1	207	20.4
	6	3	99.5	7.38	1.16	–	15.8	222	14.1
		7	72.4	7.59	0.73	–	11.1	256	23.0
August 1996	2	3	50.0	8.25	1.90	0.753	7.1	68	9.6
		7	33.5	4.12	0.57	0.086	9.5	152	16.0
	4	3	54.1	8.96	1.96	0.274	7.0	71.3	10.1
		7	42.1	5.36	0.64	0.036	9.2	170	18.5
	6	3	83.4	8.75	0.62	0.044	11.1	348	31.3
		7	83.5	4.60	0.37	0.014	21.2	583	27.5

Table 2. Sinking fluxes of particle mass, organic carbon, organic nitrogen, phosphorus and chlorophyll *a* (Chl *a*) at each station of Dokai Bay.

Date	Station	Depth (m)	Mass flux (g m ⁻² d ⁻¹)	flux (g m ⁻² d ⁻¹)			
				C	N	P	Chl <i>a</i>
August 1995	4	3	8.2	0.66	0.07	0.014	–
		7	19.5	1.21	0.14	0.015	–
	6	3	41.8	4.16	0.31	0.048	–
		7	72.4	5.24	0.55	0.053	–
August 1996	2	3	20.1	1.01	0.17	0.038	15.1
		7	62.5	2.09	0.26	0.036	5.4
	4	3	25.6	1.38	0.23	0.050	7.0
		7	110	4.63	0.59	0.070	4.0
	6	3	147	12.3	0.85	0.091	6.5
		7	307	25.6	1.41	0.114	4.3

g m⁻² d⁻¹, 1996年の3地点における沈降粒子束は、20.1~307 g m⁻² d⁻¹であった。沈降粒子束は地点ごとに大きな差があり、水深7mで得られた値を比較すると最低値19.5 g m⁻² d⁻¹ (1995年 Stn. 4, 7m), 最高値307 g m⁻² d⁻¹ (1996年 Stn. 6, 7m) と約16倍もの差が見られ湾奥で高い傾向であった。また各地点において水深3mより水深7mで沈降粒子束は大きかった。沈降粒子中の有機態炭素・有機態窒素・全リンの粒

子束を見ると、1995年の有機態炭素フラックスは0.66~5.24 gC m⁻² d⁻¹, 有機態窒素フラックスは0.07~0.55 gN m⁻² d⁻¹, 全リンフラックスは0.014~0.053 gP m⁻² d⁻¹。1996年の有機態炭素フラックスは1.01~25.6 gC m⁻² d⁻¹, 有機態窒素フラックスは0.17~1.41 gN m⁻² d⁻¹, 全リンフラックスは0.036~0.114 gP m⁻² d⁻¹であった。

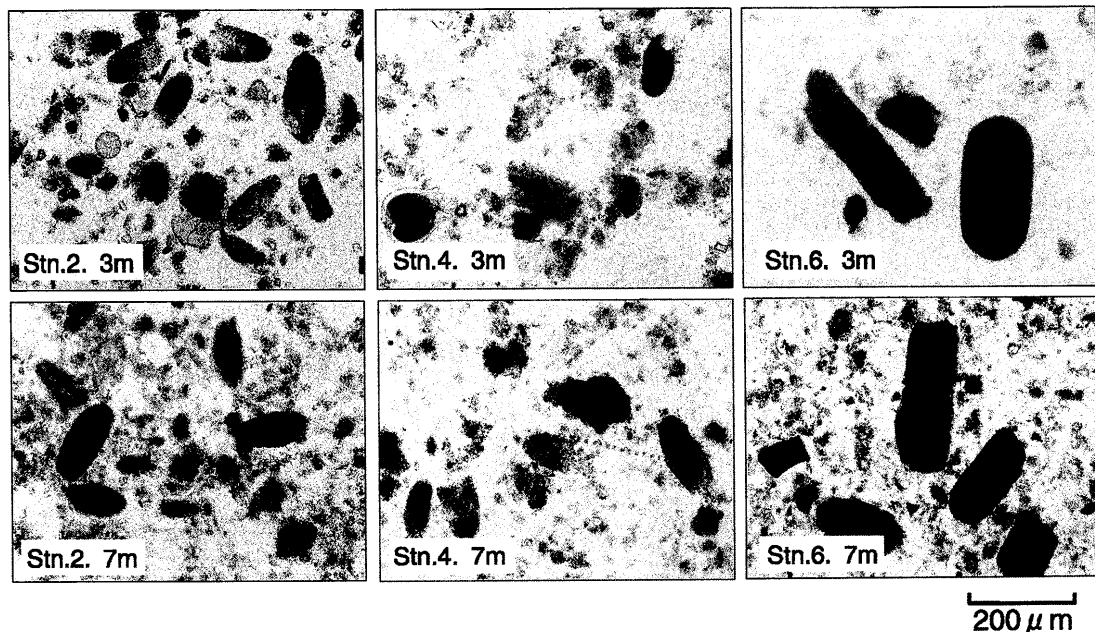


Fig. 5. Photomicrograph of sinking particles obtained with at each station of Dokai Bay in 21 August 1996.

Table 3. Copepod fecal pellets length (L), width (W), length to width ratio (L/W), volume, fecal pellets flux (FPF) and fecal carbon flux (FCF) at each station of Dokai Bay in 21 August 1996.

Station	Depth (m)	n	Length (μm)	Width (μm)	L/W	Volume ($\times 10^5 \mu\text{m}^3$)	FPF (No. $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	FCF ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
2	3	52	124 \pm 41.3	54.7 \pm 20.8	2.5 \pm 1.1	3.78 \pm 4.73	4.65 $\times 10^6$	0.100
	7	95	113 \pm 32.9	51.8 \pm 18.3	2.4 \pm 1.0	2.95 \pm 2.76	8.27 $\times 10^6$	0.139
4	3	51	116 \pm 41.2	53.2 \pm 23.4	2.4 \pm 1.0	3.74 \pm 5.71	1.92 $\times 10^6$	0.041
	7	101	110 \pm 32.9	54.1 \pm 16.3	2.1 \pm 0.7	3.08 \pm 2.69	1.12 $\times 10^6$	0.197
6	3	107	131 \pm 76.1	58.1 \pm 24.4	2.2 \pm 0.5	6.01 \pm 9.23	7.11 $\times 10^6$	0.243
	7	139	127 \pm 63.5	60.0 \pm 24.1	2.1 \pm 0.4	5.79 \pm 9.35	14.8 $\times 10^6$	0.490

*Data give the mean \pm standard deviation.

3.4. セディメントトラップで得られたフィーカルペレット

測定に供したフィーカルペレットの光学顕微鏡写真を Fig. 5 に示した。フィーカルペレットの長さは平均 110~131 μm 、幅は平均 51.8~60.0 μm で地点間において明確な差は認められなかった (Table 3)。長さとの幅の比である L/W 比は、形状の崩れたフィーカルペレットも計測したため 2.1~2.5 と Hiromi *et al.* (1988) の

測定値 (2.6~6.4) に比べ低かった。平均体積は Stn. 6 で得られたフィーカルペレットが水深 3 m, $6.01 \times 10^5 \mu\text{m}^3$; 水深 7 m, $5.79 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ と他の 2 地点で得られた平均体積 $2.95 \sim 3.78 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ に比べ大きな傾向が見られたが有意差 ($P > 0.05$, Student's t-test) は無かった。以上の結果からフィーカルペレットフラックス及びフィーカルペレット態炭素フラックスを求めた (Table 3)。フィーカルペレットフラックスは 1.12×10^6

～ $14.8 \times 10^6 \text{ No. m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ で全地点において水深 3 m より水深 7 m の方が大きかった。また、フィーカルペレット態炭素フラックスは、 $0.041 \sim 0.490 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と見積もられ、フィーカルペレットフラックスと同様に水深 3 m より水深 7 m で得られた値が大きくなる傾向であった。

4. 考察

4.1. 沈降粒子の多寡について

沈降粒子束の調査結果 ($8.2 \sim 307 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) を、日本沿岸の他の富栄養化した内湾と比較すると、Montani *et al.* (1991) の大阪湾の調査結果 ($1.0 \sim 61.8 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) や、乗木ら (1994) による東京湾の沈降粒子束 ($1.2 \sim 18.6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) より全体的に高い傾向であった。

そこで湾内の物理過程が沈降粒子に及ぼす影響について検討した。井上ら (1998) が行った洞海湾の残差流調査結果によると、1996 年 8 月 21 日の残差流は、上層は湾奥から湾口向き、下層は湾口から湾奥向きの鉛直循環流が卓越していることが判っている。このため、陸域から流入または上層で形成された粒子状物質は、その沈降過程で下層に達した時に湾奥部に押し戻される。その結果、沈降過程にある粒子状物質は湾内でトラップされやすく、滞留時間が長くなるために沈降粒子束が大きくなったと考えられた。さらに、湾奥部には、陸域からの負荷源として、河川や湾岸で最も排水量の多い化学工場や下水処理場などが存在していることから、沈降粒子束が湾口から湾奥に向かって大きくなる傾向がみられたのは整合性がある。

4.2. 沈降粒子の生化学的特徴

沈降粒子の親生物元素組成比は、粒子の由来や挙動の履歴を表すことが知られている。洞海湾で得られた沈降粒子中の親生物元素組成比が調査地点や水深毎に異なるのは、それぞれの沈降粒子の由来が異なることを表していると考えられる。そこで、親生物元素組成比について検討を行い各地点における沈降粒子の由来を推定した。

湾口から湾中央層の沈降粒子の親生物元素組成比 (Ta-

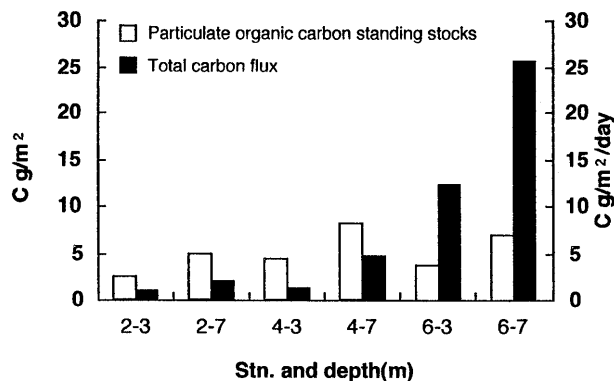


Fig. 6. Comparison of total carbon flux and standing stocks of particulate organic carbon estimated above 3 m and 7 m in water column at each station of Dokai Bay in 21 August 1996.

ble 1) は、1995 年 Stn. 4, 水深 3m C:N:P=122:11:1; 1996 年 Stn. 2, 水深 3 m C:N:P=68:10:1; 1996 年 Stn. 4, 水深 3 m C:N:P=71:10:1 と、レッドフィールド比 C:N:P=106:16:1 (Redfield *et al.*, 1963) に比較的近似していたことから、主に動植物プランクトンを起源とする粒子が沈降していると推察された。一方、湾奥部 Stn. 6 の水深 3 m で得られた沈降粒子中の親生物元素組成比は、1995 年 C:N:P=222:14:1, 1996 年 C:N:P=348:31:1 と両年とも炭素が相対的に高い特徴が見られた。そこで、トラップの設置水深以浅の水柱に存在する懸濁態有機炭素現存量のうち、有機態炭素フラックスとして沈降除去されている割合を求め比較を試みた。

その結果、Fig. 6 に示すように Stn. 2, Stn. 4 では水柱の現存量の一日当たり 32～57% が沈降しているとされ、東京湾で得られた 1.7～2.8% (門谷, 1993) より高く沈降除去されやすい傾向が見られた。しかし、Stn. 6 の一日あたり有機態炭素フラックスは懸濁態有機炭素現存量の 3 倍以上と高いことから、湾奥部では動植物プランクトンを起源としない陸起源 (人為起源) の有機態炭素に富んだ粒子が湾内に大量に流入し、急速に下層へ鉛直輸送されていると考えられた。

4.3. 懸濁粒子の生化学的特徴と沈降除去率の推定

夏季の洞海湾では、赤潮が頻繁に形成されることが知られており(山田・梶原, 2004), 1995年・1996年の観測時には湾内ほぼ全域において、水深2 m以浅のChl *a*濃度は $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上で海水は茶褐色に着色した赤潮状態(Fig. 3)であった。そこで、懸濁粒子の生化学的特徴をChl *a*と親生物元素(C, N, P)について1996年のデータを用いて最小二乗法で回帰分析を行ったところFig. 7に示すように高い相関が得られた。この結果から湾内に懸濁していた粒子は、植物プランクトンに由来する粒子が多かったと推察される。それぞれの回帰直線の傾き(±標準誤差)はPOC 2.96(±0.15), PON 0.64(±0.026), PP 0.052(±0.003)で、これらから粒子状物質の親生物元素組成比を求めるとC:N:P=57:12:1(モル比)であった。同様にして1995年の回帰直線の傾き(±標準誤差)POC 3.47(±0.53), PON 0.41(±0.080), PP 0.049(±0.008)を使用して親生物元素組成比を求めるとC:N:P=71:8:1であった。これらの親生物元素比はStn. 2, Stn. 4の水深3 mに設置したトラップで得られた沈降粒子の親生物元素組成比(Stn. 2 C:N:P=68:10:1, Stn. 4 C:N:P=71:10:1)と近似していたことから、湾口から湾中央にかけての沈降粒子は懸濁粒子の影響が大きいことが伺われた。また、回帰直線式の切片の値(±標準誤差)は、植物プランクトンの変動と関係なく存在する粒子状物質の親生物元素比を表すと考えられ、1995年はPOC $52.7 \mu\text{M}$ (±5.9), PON $3.59 \mu\text{M}$ (±0.83), PP $1.10 \mu\text{M}$ (±0.09), 1996年はPOC $38.1 \mu\text{M}$ (±2.4), PON $4.68 \mu\text{M}$ (±0.43), PP $0.99 \mu\text{M}$ (±0.05)であった。切片の値から親生物元素組成比を求めると、1995年はC:N:P=48:3:1, 1996年はC:N:P=38:5:1で、低次生産に由来しない粒子状物質はリンを豊富に含むと考えられた。

それでは、どのくらいの割合の植物プランクトンが沈降粒子として水柱から除去されているのだろうか。沈降粒子中のChl *a*フラックスと各調査地点のトラップ設置水深以浅における水柱のChl *a*現存量の比較を1996年のデータを用いて試みた。Fig. 8に示すようにChl *a*現存量はStn. 6で最も多かったが、Chl *a*フラックスはStn. 6よりStn. 2の方が大きく、現存量とフ

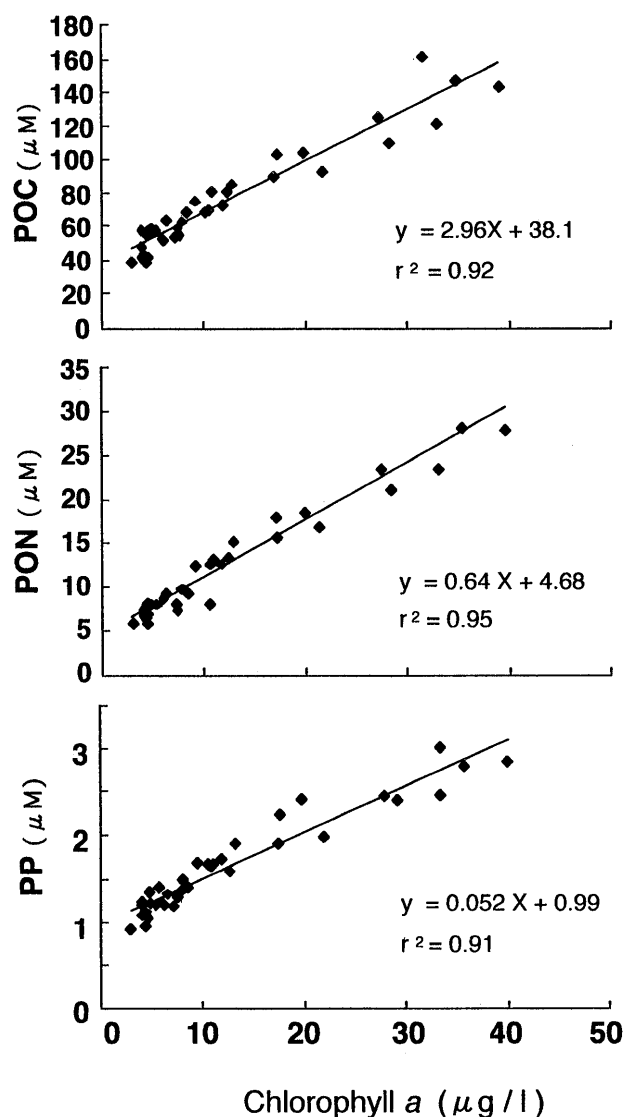


Fig. 7. Correlation of chlorophyll *a* (Chl *a*) and bioelement (POC, PON, PP) atomic concentration in suspended particles of Dokai Bay in 21 August 1996. Statistical calculation was done by least squares method.

ラックスの分布は相反する傾向であった。1996年8月21日に井上ら(1998)が行った残差流調査結果の湾奥部を見ると海底から表層方向の残差流が確認される。このような残差流の存在が、湾内に存在する植物プランクトンの沈降過程における挙動に影響を与え、水柱のChl *a*現存量とフラックスの分布が相反する結果を示したのかもしれない。この結果を東京湾における水柱のChl *a*沈降除去率0.15~0.24%(門谷, 1993)と比較する

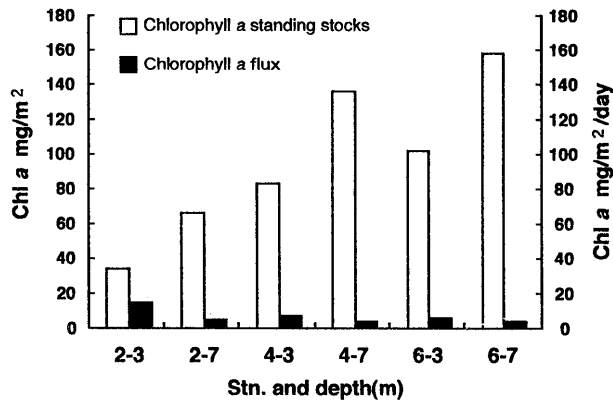


Fig. 8. Comparison of chlorophyll *a* flux and standing stocks of chlorophyll *a* estimated above 3 m and 7 m in water column at each station of Dokai Bay in 21 August 1996.

と、今回の調査で得られた値は6.4~44.3%と極めて高かった。これは、トラップ設置水深が3 mと浅く、赤潮の直下に設置できたことが要因として考えられた。

次に、沈降粒子の有機態炭素フラックスに占める植物プランクトン由来有機態炭素の推定を試みた。推定を行う際に Fig. 7 で見られた相関関係から Chl *a* の変動と相関のある有機物を植物プランクトン由来の有機物と仮定した。海水中の植物プランクトン由来有機物と Chl *a* の比は Fig. 7 で得られた関係式の傾きより $C/Chl\ a=36$ であった。この値を用いて1996年8月21日の植物プランクトン由来有機態炭素粒子束を求め有機態炭素フラックスとの比較を試みた。植物プランクトン由来有機態炭素粒子束は $0.144\sim 0.540\text{ gC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ と計算され、湾口の Stn. 2, 水深3 m の有機態炭素フラックス中に占める植物プランクトン由来有機態炭素粒子の割合は約54%と高かったが、湾奥部の Stn. 6, 水深7 m では0.6%と低く見積もられ、前述の Chl *a* 沈降除去率と同様の傾向であった (Table 4)。

4.4. 有機態炭素フラックスと基礎生産量の比較

1996年8月21日の調査時には、基礎生産量が湾中央部と湾奥部の2地点で測定されているので、基礎生産量と水深3 m 及び水深7 m で得られた有機態炭素フ

ラックスの比較を行った。湾中央部の比較には Stn. 4 に近い Stn. T で得られた基礎生産量 3 m 層生産量; $176\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ と 4 m 層生産量; $223\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ (Tada *et al.*, 2001) を使用した。湾奥部 Stn. 6 の比較には 3 m 層生産量; $1,378\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ と 4 m 層生産量; $1,470\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ (多田 私信) を用いた。なお、水深7 m で得られた有機態炭素フラックスとの比較に4 m 層までの基礎生産量を用いたのは、洞海湾の平均水深(7 m)が浅いことや基礎生産速度が水深と共に指数関数的に減少するため4 m 層までと7 m 層までの基礎生産量はほぼ等しいと判断したためである。その結果、Stn. 4 及び Stn. 6 の有機態炭素フラックスは基礎生産量の約7~20倍 (Table 4) と非常に高く、基礎生産では説明できない量の粒子状有機態炭素が沈降していることが分かった。三河湾 (佐々木, 1993) や広島湾 (清木ら, 1985) の有機態炭素フラックスは基礎生産量の約10~30%であることを考えれば、明らかに基礎生産とは起源の異なる有機態炭素に富んだ粒子が沈降していることを示していた。このことは、Stn. 6 で得られた沈降粒子の親生物元素比 C/P が 3 m: 348, 7 m: 583 (Table 1) とレッドフィールド比の C/P=106 に比べ高いことから支持される。

4.5. フィーカルペレットが沈降粒子に与える影響

コペポードのフィーカルペレットが有機物の鉛直輸送手段として果たす役割を検討するため調査地点毎のフィーカルペレット態有機態炭素フラックスと沈降粒子の有機態炭素フラックスの比較を試みた。Table 4 に示すように有機態炭素フラックスに占めるフィーカルペレット態有機態炭素フラックスの割合は1.9~9.9%で各地点とも水深7 m より水深3 m の方が高く、湾口部の Stn. 2 から湾奥部の Stn. 6 に向かって低くなった。東京湾での調査結果 (上, 1993) によると炭素フラックス中に占めるフィーカルペレット態炭素フラックスの割合は10~28%で変動することが知られている。また、Sasaki *et al.* (1988) によると親潮流域では4~19%を占めるため、下方への物質輸送手段として重要な役割を果たしていると考えられている。しかし、洞海湾の沈降粒子の有機態炭素フラックスは東京湾や親潮流域

Table 4. Comparison of total carbon flux (TC), phytoplankton origin carbon flux (Phyt. C), primary production (Pri. Pr) and fecal carbon flux (FCF) at each stations of Dokai Bay in August 1996.

Station	Depth (m)	TC	Phyt. C	FCF	Pri. Pr	Phyt. C/TC	FCF/TC	TC/Pri. Pr
2	3	1.01	0.540	0.100	—	54.0	9.9	—
	7	2.09	0.194	0.139	—	9.3	6.6	—
4	3	1.38	0.250	0.041	0.176 (Stn. T)*	18.2	3.0	784
	7	4.63	0.144	0.197	0.223 (Stn. T)*	3.1	4.3	2,076
6	3	12.3	0.230	0.243	1.38**	1.9	2.0	891
	7	25.6	0.155	0.490	1.44**	0.6	1.9	1,741

*Tada *et al.* (2001) **Personal communication from Tada.

で得られた値に比べ高いため、コペポダの排泄によるフィーカルペレット態炭素フラックスの割合は低く、有機物の鉛直輸送手段としての寄与は小さいと考えられた。

1996年8月21日の動物プランクトンの調査結果(Uye *et al.*, 1998)によると、出現した代表的なコペポダは *Euterpina* 属, *Acartia* 属, *Oithona* 属で、洞海湾のネット動物プランクトン現存量は瀬戸内海と比較して高く、生産速度も高いことが指摘されている。調査時のネット動物プランクトン現存量に占めるコペポダの割合は43%で、コペポダ以外の動物プランクトン(二枚貝類幼生 > ヤムシ類 > 多毛類幼生)が優占していた。この調査結果から判断すると、ネット動物プランクトン全体の排泄によるフィーカルペレットが沈降粒子に占める割合は、コペポダのそれより高いと考えられる。

5. まとめ

本研究は、過栄養状態で地点間の環境傾度が強い洞海湾において、粒子状物質の生化学的特徴を明らかにし、その沈降・除去過程を検討することにより低次生産過程が物質の循環や輸送に果たす役割について考察した。

沈降粒子の有機態炭素フラックスに占める植物プランクトン由来有機態炭素フラックスやフィーカルペレット態有機態炭素フラックスの割合はトラップを設置した

水深3 m, 水深7 m 共に湾奥 Stn. 6 < 湾央 Stn. 4 < 湾口 Stn. 2 の順に大きくなることが確認された (Table 4)。そのため、低次生産過程が鉛直方向の物質輸送に及ぼす影響は、湾奥から湾口に向かって大きくなり、Stn. 2 の水深3 m では有機態炭素フラックスに占める植物プランクトン由来有機態炭素フラックスとフィーカルペレット態有機態炭素フラックスを合わせると63.9%と高い値を示した。Stn. 2 及び Stn. 4 の有機態炭素フラックスに占める植物プランクトン由来有機態炭素フラックスの割合を水深3 m と水深7 m で比較すると水深7 m の値は水深3 m で得られた値より一桁低くなることから、植物プランクトン由来有機物は沈降過程において分解が進行していると考えられた。しかし、フィーカルペレット態有機態炭素フラックスが有機態炭素フラックスに占める割合 (Table 4) は水深3 m と水深7 m で差の見られなかったことは、植物プランクトン由来有機物と比較して沈降過程において分解の影響が少ないことや沈降速度が大きく素早く下層へ鉛直輸送されたことを示すものと考えられた。湾奥 Stn. 6 は、有機態炭素フラックスに占める植物プランクトン由来有機態炭素フラックスやフィーカルペレット態有機態炭素フラックスの割合が小さいことから低次生産過程が物質輸送に及ぼす影響は非常に低いと考えられた。また、湾奥 Stn. 6 の沈降粒子の C/N=11~21 は、調査当日の懸濁粒子の C/N=4.6 やレッドフィールド比 C/N=6.6 に比べ高いこと、有機態炭素フラックスが水柱の懸濁

態有機炭素現存量や基礎生産量以上であったこと等から明らかに陸域から流入荷重された有機態炭素に富んだ粒子が急速に下層へ鉛直輸送されていると考えられた。このことは、懸濁粒子中では有機物の現存量として主要な位置を占めている可能性は低いが高い沈降速度を持つ粒子であるか、あるいはトラップの係留中にイベント的に流入した粒子である可能性を示している。

本研究の結果より、洞海湾は全長約 13 km と小規模ながら湾内における粒子状物質の起源や物質循環過程は地点で異なり、湾口から湾中央にかけては低次生産過程が寄与しているが湾奥は陸域の影響を受けていることが示唆された。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、観測の実施や試料の測定にご助力頂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にも感謝いたします。さらに有益なご指摘を頂いた査読者ならびに編集委員に感謝の意を表します。

References

- Gonzalez, H. E., and V. Semetcek (1994): The possible role of the cyclopoid copepod *Oithona* in retarding vertical flux of zooplankton fecal material. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **113**, 233-246.
- 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.
- Hiroki, J., H. Hiyama, and S. Kadota (1988): Morphological observations of fecal pellets produced by inlet water copepods under experimental conditions. *Bull. coll. Agr. & Vet. Med.*, Nihon Univ., **45**, 219-226.
- 井上 康一, 柳 哲雄, 山田 真知子, 門谷 茂 (1998): 洞海湾の残差流. *愛媛大学工学部紀要*, **17**, 283-290.
- 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.
- Lorenzen, C. J. (1967): Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, **12**, 343-346.
- 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. *Limnol. Oceanogr.*, **10**, 280-282.
- Montani, S., K. Tada, and T. Okaichi (1988): Purine and pyrimidine base in marine particles in the Seto Inland Sea, Japan. *Mar. Chem.*, **25**, 359-371.
- Montani, S., Y. Mishima, and T. Okaichi (1991): Scavenging process of marine particles in Osaka Bay. *Mar. Poll. Bull.*, **23**, 107-111.
- 門谷 茂 (1991): 物質輸送過程における粒子状物質の役割. *月刊海洋*, **23**, 178-186.
- 門谷 茂 (1993): 粒子の生化学的キャラクターゼーションから見た物質輸送過程. *月刊海洋*, **25**, 40-45.
- Murphy, J and J. P. Riley (1962): A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.*, **27**, 31-36.
- 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.
- Parsons, T. R., Y. Maita, and G. MLall (1984): *A Manual of chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- Redfield, A. C., Ketchum, B. H. and Richards, F. A. (1963): The influence of organisms on the composition of sea water, 26-77. *The Sea*, Vol. 2, edited by M. N. Hill. Wiley-Interscience., New York.
- Sasaki, H., H. Hattori, and S. Nishizawa (1988): Downward flux of particulate organic matter and vertical distribution of calanoid copepods in Oyashio Water in summer. *Deep-Sea Res.*, **35**, 505-515.
- 佐々木 克之 (1993): 内湾および干潟における物質循環と生物生産【5】. 沈降物捕集方法と三河湾の沈降量, *海洋と生物*, **15**, 319-324.
- 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*, **18**, 304-313.
- Suzuki, R., and T. Ishimaru (1997): An improved method for determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-dimethyl-formamid. *J. Oceanogr.*, **46**, 190-194.
- Tada, K., M. Morishita, M. Yamada, and S. Montani (2001): Standing stock and production rate of phytoplankton and a red tide outbreak in a heavily eutrophic embayment, Dokai Bay, Japan. *Mar. Poll. Bull.*, **42**, 1,178-1,181.
- Uye, S., N. Nagano, and T. Shimazu (1998): Biomass production and trophic roles of micro- and net-zooplankton in Dokai Inlet, a heavy eutrophic inlet, in summer. *Plankton Biol. Ecol.*, **45**, 171-182.
- 上 真一 (1993): 動物プランクトンの糞粒. *月刊海洋*, **25**, 46-51.
- 柳 哲雄 (1991): 東京湾の物質輸送過程. *月刊海洋*, **23**, 175-177.
- 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*, **15**, 281-293.

Marine Lower Trophic Processes and Origin of Particulate Organic Matter Inferred from the Biochemical Characteristics in Hypertrophic Bayment (Dokai-bay) at Summer

Ken-ichiro Hamada ^{††}• Naoko Ueda [†]• Machiko Yamada [§]• Kuninao Tada [¶]• Shigeru Montani [‡]

Abstract

Chemical characteristics of particulate organic matter were investigated to elucidate influences of marine lower trophic processes on material cycling in hypertrophic bayment (Dokai-Bay) in summer. Sinking particles were collected twice by setting up a sediment trap at three points in the bay in August of 1995 and 1996 when red tides occurred. Total settling mass flux varied from 8.2 to 307 g m⁻² d⁻¹, which was greater than that in other inner bays. Apparent increase in total mass flux was observed both from the mouth (Stn. 2, 20.1~62.5 g m⁻² d⁻¹) to the inner (Stn. 6, 41.8~307 g m⁻² d⁻¹) part of the bay and from 3 to 7 meters depth. In the inner part and middle part of the bay, biophile elements and biochemical composition ratios of sinking particles (1996; Stn. 2, 3m C:N:P=68:10:1, Stn. 4, 3m C:N:P=71:10:1) were close to those of suspended particles (1996; C:N:P=57:12:1). It was found that the proportion of phytoplankton origin organic carbon flux and fecal carbon flux in total organic carbon flux increased with getting nearer to the mouth of the bay. Since C/N (11~20) of the sinking particles was higher than that of the suspended particles (4.6) and the Redfield ratio (6.6) in the inner part of the bay, it was thought that the origin of the particulate organic matter was the land. From these results, it was confirmed that material cycling and the origin of particulate organic matter in the bay differed in the locations; the origin in the inner part of the bay was the land and that in the mouth and middle part of the bay was produced by marine lower trophic processes.

Key words: Dokai Bay, Hypertrophic Bayment, Sinking particles, Organic carbon, Marine lower trophic processes

(Corresponding author's e-mail address: k-hamada@env.kitakyu-u.ac.jp)

(Received 10 April 2007; accepted 4 February 2008)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2008)

[†] Aqua Research Center, The University of Kitakyushu, 1-1 Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu 804-0082, Japan

[‡] Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, N10W5 Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

[§] Department of Environmental Science, Fukuoka Women's University, 1-1-1 Kazumigaoka, Higashi-ku, Fukuoka 813-8529, Japan

[¶] Department of Life Sciences, Kagawa University, 2393 Ikenobe, Miki-cho, Kita-gun, Kagawa 761-0795, Japan