

## 夏季の三河湾における窒素の収支

— PONを3区分する試み —

井野川伸男・石田基雄・黒田伸郎・蒲原 聡・岡田 元

The budget of nitrogen during summer in Mikawa Bay.  
— Analysis of separating PON into three fractions —INOKAWA Nakao,\* ISHIDA Motoo,\* KURODA Nobuo,\*  
KAMOHARA Satoru,\* and OKADA Gen\*

キーワード; 窒素収支, 物質循環, PONの区分

三河湾は、東京湾や大阪湾など汚濁が進んだ代表的な内湾に比べて汚濁負荷の割に富栄養化が著しい。周年にわたって発生する赤潮や夏季躍層下に発生する貧酸素水塊は富栄養化にともなう諸現象であり、これらは漁業生物の生産に悪影響を与えていると思われる。

内湾における栄養物質は、流れによって運ばれたり、拡散したりする他、生物活動によって有機化と無機化が繰り返されている。

このような挙動を定量的に解析する試みは各地でなされているが、三河湾については、佐々木ら<sup>1)</sup>、松川<sup>2)</sup>がボックスモデル法によって解析している。

これらは主にDTN(溶解態総窒素)の収支から植物プランクトンの生産やバクテリアによるDTNの再生を推定したものでPON(懸濁態有機窒素)の収支にはあまり触れられていない。これは、PONを構成している植物プランクトンや動物プランクトン、デトリタスが中で変化するため、PONを一要素として解析することができないためである。

筆者らは、PONを上記の3種類に区分し、DTNと併せて4種類を生態系の構成要素に設定し、各構成要素の現存量と挙動の解析から、三河湾の富栄養化の実態を明らかにした。

## 実験方法

調査と測定項目 調査対象海域とした三河湾は、知多半島と渥美半島で囲まれた面積が604 km<sup>2</sup>、平均水深が9 m<sup>3)</sup>の閉鎖的な湾であり、三河湾西部を知多湾、同東部を渥

美湾と呼ぶ。図1は三河湾の概要と本研究における調査地点である。

調査は、1989年7月から9月まで月2回行ったが、渥美湾については1990年と1991年の6~9月にも月2回行った。

測定項目は水温、塩分、PON、DTN、クロロフィルa、フェオ色素(a)及び動物プランクトン態窒素とした。測定層は水温と塩分が表層から底層(底上1 m)まで1 m毎、他の項目が表層、5 m層及び底層とした。測定方法は水温と塩分がCSTDメーター(EMS製EMS-12型)、PONがDumas法に基づく元素分析(日本化学学会編「実験化学講座」16に掲げる方法、ヤナコ製CHNコーダー)、DTNが紫外線分解法(海洋環境調査法に定める方法)、クロロフィルaとフェオ色素(a)が抽出蛍光法(海洋観測指針による方法)とした。なお、動物プランクトン態窒素については「PONの区分法」で述べる。

PONの区分法 動物プランクトンは、採水した海水5リットルを船上において目合い330 μmのプランクトンネットで濾過し、残渣を濾過海水で洗浄して分析試料とした。この分析試料は、実験室にてGF/Cガラスフィルターで濾過し、Dumas法に基づく元素分析に供してN量を求めた。なお、分析試料に夾雑物が多い場合は動物プランクトンを選別して分析した。夜光虫(*Noctiluca scintillans*)はその食性から動物プランクトンとして扱った。

植物プランクトンとデトリタスについては、PONから動物プランクトンを差し引き、残りをクロロフィルaとフェオ色素(a)の比率で両者に分けた。

\* 愛知県水産試験場(本場)

(Aichi Fisheries Research Institute, Miya, Gamagori, Aichi 443, Japan)

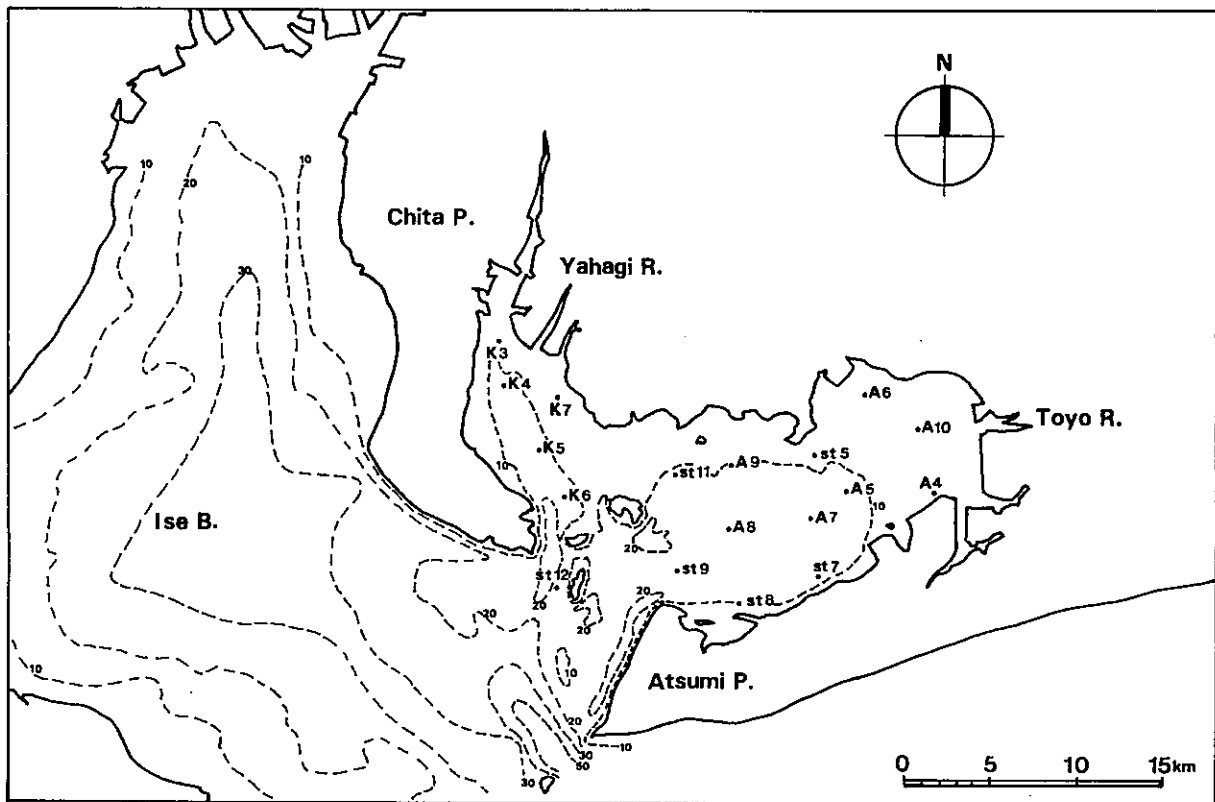


図1 三河湾の概要と調査地点

三河湾では有機物現存量と植物プランクトンの光合成活性は密接な関係があることが知られており、<sup>4)</sup> 懸濁物の大半が植物プランクトン由来と考えられている。

クロロフィルaは植物プランクトンの指標物質であり、フェオ色素(a)はクロロフィルaの消化過程で生成されるため死んだ植物プランクトンの指標として考えることができる。また、クロロフィルa 1 mg/lとフェオ色素(a) 1 mg/lは同じ当量であることから、植物プランクトンとデトリタスの比はクロロフィルaとフェオ色素の濃度比で表すことができる。

ボックスモデルと物質収支の解析法 現存量及び収支計算は三河湾を3海域に区分して行った。図2はその海域区分であり、Box 1が知多湾奥、Box 3が渥美湾奥、Box 2が両湾の湾口である。表1は各Boxの諸元である。また、夏季の三河湾は、図3に示したように水深4~7mに形成される躍層によって強い成層状態となるので、物質収支の計算は上層(表層~5m層)と下層(5m層~底層)に分けて求めた。

各要素の現存量については、各ボックスをメッシュに区切って、調査点の値をそれぞれのメッシュに補完して

表1 ボックスの諸元

項 目	Box1	Box2	Box3
$V_1$ : 上層ボックス容積( $\text{cm}^3$ )	$0.489 \times 10^{15}$	$0.800 \times 10^{15}$	$0.133 \times 10^{16}$
$V_2$ : 下層ボックス容積( $\text{cm}^3$ )	$0.381 \times 10^{15}$	$0.840 \times 10^{15}$	$0.910 \times 10^{15}$
$A_1$ : 上層ボックス横断面積( $\text{cm}^2$ )	$0.460 \times 10^9$	$0.630 \times 10^9$	$0.890 \times 10^9$
$A_2$ : 下層ボックス横断面積( $\text{cm}^2$ )	$0.450 \times 10^9$	$0.670 \times 10^9$	$0.850 \times 10^9$
$A_0$ : 内部境界面積( $\text{cm}^2$ )	$0.781 \times 10^{12}$	$0.118 \times 10^{13}$	$0.185 \times 10^{13}$

集計した。上層は表層と5m層の値の平均値を代表値とし、下層は5m層と底層の値の平均値を代表値とした。ただし、塩分については1m毎の値をそのまま用いた。

各ボックス間の物質収支の計算は松川(1983)<sup>9)</sup>の2層ボックスモデルによる解析法を用いた。この解析法の基礎式は表2に示した。

この基礎式と表1に示した各ボックスの諸元、河川流量、及び観測で得られた塩分から、それぞれの調査期間内の $U_1$ ,  $U_2$ ,  $W_0$ ,  $K_{x1}$ ,  $K_{x2}$ ,  $K_{z0}$ が得られる。

Nの各要素毎の挙動に関する方程式を表3に示した。移流量、拡散量は上記 $U_1$ ,  $U_2$ ,  $W_0$ ,  $K_{x1}$ ,  $K_{x2}$ ,  $K_{z0}$ と各要素の現存量から計算できる。

デトリタス及びDTNの負荷量については鈴木<sup>6)</sup>の方法にそってTotal-Nを求め、これまでの経験値からそれをデトリタス1:DTN4にわけた。

沈降速度にはSmayda<sup>7)</sup>が取りまとめた*Skeletonema costatum*の生細胞と死細胞の平均的な値(生細胞=植物プランクトン:  $5.8 \times 10^{-4}$  cm/sec, 死細胞=デトリタス:  $1.1 \times 10^{-3}$  cm/sec)を与えた。*S. costatum*は、夏季の三河湾では代表的な赤潮プランクトンなので、<sup>8-10)</sup>この期間の数値としては適切と考える。

また、松川<sup>11)</sup>はPONの沈降速度を $10^{-4}$  cm/secのオーダーと推定しているが、計算に用いた値は松川の値と概ね一致する。

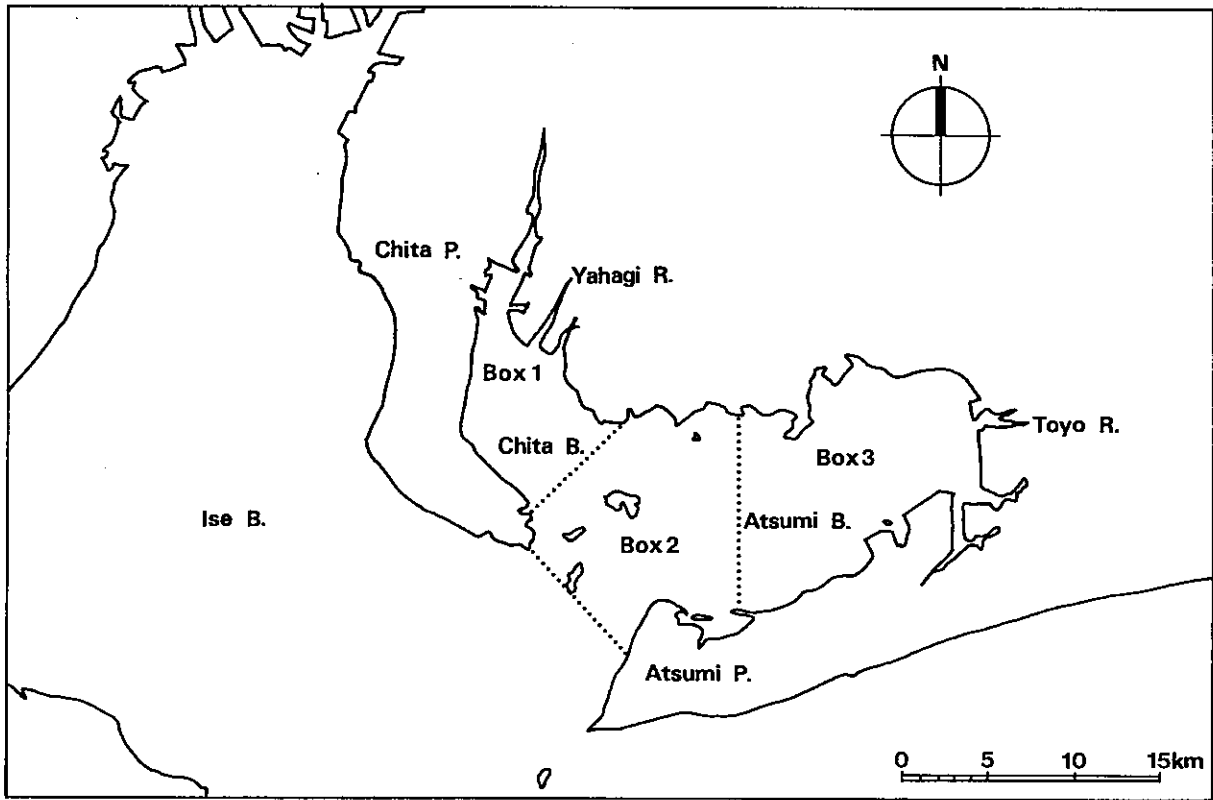


図2 三河湾の海域区分

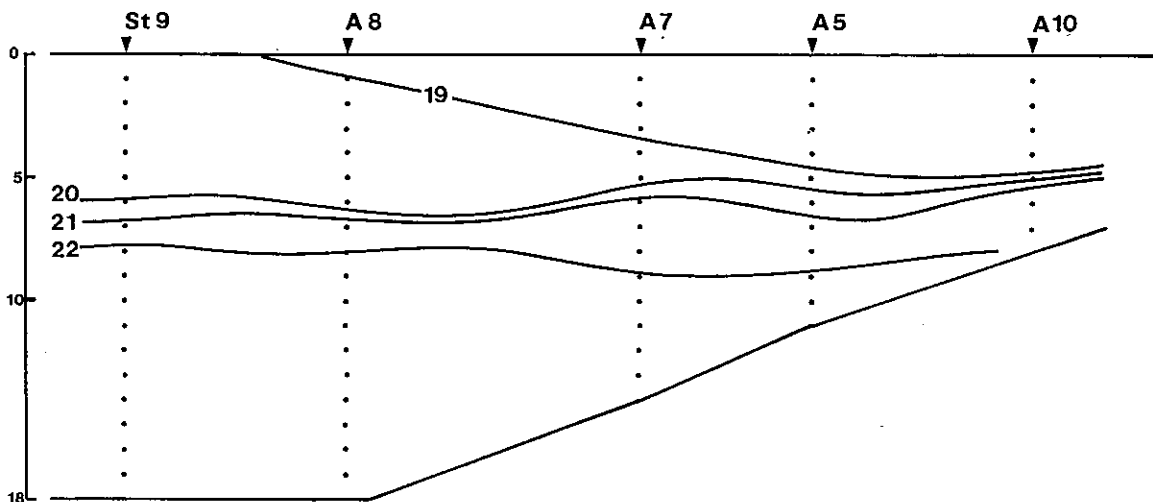


図3 三河湾の湾軸沿い測点における $\sigma_t$ の鉛直分布 (A10からSt9における鉛直断面, 1990, 8, 2)

これら各パラメータと各要素の期間内の増減から、それぞれの生産速度を求めることができる。ただし、この生産速度は、例えば植物プランクトンの場合、栄養塩の取り込み量から枯死、被食と細胞外分泌を差し引いたネッ

トの生産を表す。

また、この報告では各要素の収支については、それぞれの期間毎の結果の平均値を示した。

表2 ボックスモデルの基礎式 (松川<sup>5)</sup>による)

項目	基礎式
水量の約合	(上層) $\frac{\partial V_1}{\partial t} + A_1 U_1 - A_0 W_0 = Q \quad \dots \dots \textcircled{1}$
	(下層) $\frac{\partial V_2}{\partial t} + A_2 U_2 + A_0 W_0 = 0 \quad \dots \dots \textcircled{2}$
	(全層) $A_1 U_1 + A_2 U_2 - Q = 0 \quad \therefore \frac{\partial}{\partial t} (V_1 + V_2) = 0$ (潮汐周期より長い時間でみれば) $\dots \dots \textcircled{3} (\textcircled{1} + \textcircled{2})$
塩素量の約合	(上層) $\frac{\partial}{\partial t} (V_1 S_1^*) + A_1 \left\{ U_1 S_1 - K_{x1} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_1 \right\} - A_0 \left\{ W_0 S_0 - K_{z0} \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)_0 \right\} = 0 \quad \dots \dots \textcircled{4}$
	(下層) $\frac{\partial}{\partial t} (V_2 S_2^*) + A_2 \left\{ U_2 S_2 - K_{x2} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_2 \right\} + A_0 \left\{ W_0 S_0 - K_{z0} \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)_0 \right\} = 0 \quad \dots \dots \textcircled{5}$
	(全層) $\left\{ \frac{\partial}{\partial t} (V_1 S_1^* + V_2 S_2^*) - \left\{ A_1 K_{x1} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_1 + A_2 K_{x2} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_2 \right\} + A_1 U_1 S_1 + A_2 U_2 S_2 \right\} = 0 \quad \dots \dots \textcircled{6} (\textcircled{4} + \textcircled{5})$
流速	(上層) $U_1 = \frac{1}{A_1 (S_2 - S_1)} \left\{ Q S_2 + \frac{\partial}{\partial t} (V_1 S_1^* + V_2 S_2^*) - \left\{ A_1 K_{x1} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_1 + A_2 K_{x2} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_2 \right\} \right\} \quad \dots \dots \textcircled{7} (\textcircled{6} - \textcircled{3} \times S_2 \text{を整理})$
	(下層) $U_2 = \frac{-1}{A_2 (S_2 - S_1)} \left\{ Q S_2 + \frac{\partial}{\partial t} (V_1 S_1^* + V_2 S_2^*) - \left\{ A_1 K_{x1} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_1 + A_2 K_{x2} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_2 \right\} \right\} \quad \dots \dots \textcircled{8} (\textcircled{6} - \textcircled{3} \times S_1 \text{を整理})$
	(鉛直流) $W_0 = \frac{-1}{A_0} \frac{\partial V_2}{\partial t} + A_2 U_2 = -\frac{A_2}{A_0} U_2 \quad \therefore \frac{\partial V_2}{\partial t} = 0 \quad \dots \dots \textcircled{9} (\textcircled{6} \text{から})$
鉛直拡散係数	$K_{z0} = \frac{-1}{2A_0} \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)_0 \frac{\partial (V_1 S_1^*)}{\partial t} - \frac{\partial (V_2 S_2^*)}{\partial t} - A_1 K_{x1} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_1 - A_2 K_{x2} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_2 - A_1 U_1 S_1 - A_2 U_2 S_2 - 2A_0 W_0 S_0$

- $V_1, V_2$  : 上層と下層の体積
- $A_1, A_2, A_0$  : 上層と下層の横断面積及び内部境界面積
- $U_1, U_2, W_0$  : 上層と下層をよぎる水平流速及び内部境界をよぎる鉛直流速 ( $U_1, U_2$ は湾の外向きを正、 $W_0$ は上向きを正)
- $Q$  : 河川流量
- $S_1^*, S_2^*$  : 上層と下層の平均塩素量
- $S_1, S_2, S_0$  : 上層と下層の横断面の平均塩素量及び内部境界面の平均塩素量
- $K_{x1}, K_{x2}, K_{z0}$  : 上層と下層の水平拡散係数及び鉛直拡散係数
- $\left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_1, \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_2, \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)_0$  : 上層と下層における水平方向の塩素量勾配及び上・下層の鉛直方向の塩素量勾配

表3 ボックスモデルにおける各要素の窒素循環に関する動態方程式

項目	動態方程式
植物プランクトン	時間変化 = (移流) + (拡散) + (生産) - (沈降)
	(上層) $\frac{\partial P_1^* V_1}{\partial t} = (-A_1 U_1 P_1 + A_0 W_0 P_0) + A_1 K_{x1} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)_1 - A_0 K_{z0} \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)_0 + (\text{生産}) - (A_0 W_p P_0)$
(下層) $\frac{\partial P_2^* V_2}{\partial t} = (-A_2 U_2 P_2 - A_0 W_0 P_0) + A_2 K_{x2} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)_2 + A_0 K_{z0} \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)_0 + (\text{生産}) - (A_0 W_p P_0 - A_0 W_p P_0)$	
動物プランクトン	時間変化 = (移流) + (拡散) + (生産)
	(上層) $\frac{\partial Z_1^* V_1}{\partial t} = (-A_1 U_1 Z_1 + A_0 W_0 Z_0) + A_1 K_{x1} \left( \frac{\partial Z}{\partial x} \right)_1 - A_0 K_{z0} \left( \frac{\partial Z}{\partial z} \right)_0 + (\text{生産})$
(下層) $\frac{\partial Z_2^* V_2}{\partial t} = (-A_2 U_2 Z_2 - A_0 W_0 Z_0) + A_2 K_{x2} \left( \frac{\partial Z}{\partial x} \right)_2 + A_0 K_{z0} \left( \frac{\partial Z}{\partial z} \right)_0 + (\text{生産})$	
デトリタス	時間変化 = (移流) + (拡散) + (生産) - (沈降) + (負荷) *1
	(上層) $\frac{\partial D_1^* V_1}{\partial t} = (-A_1 U_1 D_1 + A_0 W_0 D_0) + A_1 K_{x1} \left( \frac{\partial D}{\partial x} \right)_1 - A_0 K_{z0} \left( \frac{\partial D}{\partial z} \right)_0 + (\text{生産}) - (A_0 W_d D_0) + (Q_d)$
(下層) $\frac{\partial D_2^* V_2}{\partial t} = (-A_2 U_2 D_2 - A_0 W_0 D_0) + A_2 K_{x2} \left( \frac{\partial D}{\partial x} \right)_2 + A_0 K_{z0} \left( \frac{\partial D}{\partial z} \right)_0 + (\text{生産}) - (A_0 W_d D_0 - A_0 W_d D_0)$	
DTN	時間変化 = (移流) + (拡散) + (生産) + (負荷) *1
	(上層) $\frac{\partial N_1^* V_1}{\partial t} = (-A_1 U_1 N_1 + A_0 W_0 N_0) + A_1 K_{x1} \left( \frac{\partial N}{\partial x} \right)_1 - A_0 K_{z0} \left( \frac{\partial N}{\partial z} \right)_0 + (\text{生産}) + (Q_n)$
(下層) $\frac{\partial N_2^* V_2}{\partial t} = (-A_2 U_2 N_2 - A_0 W_0 N_0) + A_2 K_{x2} \left( \frac{\partial N}{\partial x} \right)_2 + A_0 K_{z0} \left( \frac{\partial N}{\partial z} \right)_0 + (\text{生産})$	

- $P_1^*, Z_1^*, D_1^*, N_1^*$  : 植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス、DTNの平均濃度。iは、1が上層、2が下層を示す。
- $P_i, Z_i, D_i, N_i$  : 植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス、DTNの上層 (i=1) と下層 (i=2) の横断面の平均濃度及び内部境界面 (i=0) と底層 (i=b) の平均濃度
- $\left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)_1, \left( \frac{\partial Z}{\partial x} \right)_1, \left( \frac{\partial D}{\partial x} \right)_1, \left( \frac{\partial N}{\partial x} \right)_1$  : 植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス及びDTNの水平方向の濃度勾配
- $\left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)_0, \left( \frac{\partial Z}{\partial z} \right)_0, \left( \frac{\partial D}{\partial z} \right)_0, \left( \frac{\partial N}{\partial z} \right)_0$  : 植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス及びDTNの鉛直方向の濃度勾配
- $W_p, W_d$  : 植物プランクトンとデトリタスの沈降速度
- $Q_d, Q_n$  : デトリタスとDTNの負荷量 (\*1: 上層のみ)

## 結 果

植物プランクトン, 動物プランクトン, デトリタス及びDTNの現存量 表4は, Box 1 ~Box 3における植物プランクトン, 動物プランクトン, デトリタス及びDTNの現存量の推定値である。Box 1とBox 2は1989年7~9月の結果であるが, Box 3は1990年と1991年の6~9月の結果を併せて記載した。

上層における植物プランクトンの現存量は, 平均値±標準偏差で表すと, Box 1が53.1±27.7 tonN, Box 2が44.2±15.6 tonN, Box 3が125.7±87.1 tonNであった。Box 3の値は, 1991年6月の値(439.8 tonN)が影響したもので, これを除けば99.9±38.8 tonNとなり, たぶ

んこれが一般的な値と思われる。

上層における植物プランクトンの消長は, 愛知県が行っている赤潮調査結果<sup>8-10)</sup>と良く一致する。調査期間中における三河湾の赤潮の発生時期と種は, 1989年7月上旬~中旬における*S. costatum*を主とする珪藻類, 1990年6月における*S. costatum*, 同年8月~9月における*Nitzschia spp.*, 1991年6月における*Heterosigma sp.*, 同年8月上旬と9月上旬における*S. costatum*を主とする珪藻類であり, 現存量の推移と符合する。

下層における植物プランクトンの現存量は, Box 1が19.1±7.7 tonN, Box 2が27.4±11.8 tonN, Box 3が51.6±20.0 tonNであった。これらの値を上層の値と比較するとBox 1が36.0%, Box 2が62.0%, Box 3が

表4 Box 1~Box 3における植物プランクトン, 動物プランクトン, デトリタス及びDTNの現存量の推定値 (tonN)

年 月 日	植物プランクトン		動物プランクトン		デトリタス		D T N	
	上 層	下 層	上 層	下 層	上 層	下 層	上 層	下 層
BOX1								
1989.7.12	97.6	19.8	2.4	1.5	55.8	25.5	122.0	110.0
1989.8.7	53.0	29.1	3.1	3.1	37.1	16.9	102.5	106.6
1989.8.21	37.6	19.9	3.4	2.4	25.2	18.3	96.2	79.2
1989.9.5	24.0	7.4	2.5	3.4	39.1	17.9	332.0	129.6
平 均	53.1	19.1	2.9	2.6	39.3	19.7	163.2	106.4
標準偏差	27.7	7.7	0.4	0.7	10.9	3.4	97.9	18.0
BOX2								
1989.7.12	68.2	21.2	10.4	5.5	49.4	38.2	160.3	214.1
1989.8.7	46.2	44.3	6.8	7.3	29.7	28.4	144.2	179.6
1989.8.21	36.6	31.3	4.3	4.3	29.7	33.3	146.6	153.2
1989.9.5	25.9	12.7	6.1	6.0	45.1	34.3	308.5	233.5
平 均	44.2	27.4	6.9	5.8	38.5	33.6	189.9	195.1
標準偏差	15.6	11.8	2.2	1.1	8.9	3.5	68.7	30.9
BOX3								
1989.7.12	153.6	39.0	15.1	7.4	97.3	54.6	286.7	251.0
1989.8.7	78.5	69.0	10.3	5.9	52.7	41.9	253.6	191.3
1989.8.21	94.2	54.8	7.2	5.4	67.6	52.4	321.2	255.3
1989.9.5	46.2	18.2	10.7	6.6	63.9	37.3	605.0	314.4
1990.6.5	136.6	33.1	8.6	4.3	126.1	59.2	272.3	201.7
1990.6.19	101.9	47.1	7.6	9.3	116.5	61.5	226.8	164.1
1990.7.4	89.9	51.8	6.5	4.2	39.2	26.1	236.3	159.9
1990.7.17	52.4	39.9	10.0	5.9	51.6	39.9	235.9	204.4
1990.8.2	64.9	42.9	9.3	5.5	43.1	45.6	219.2	251.4
1990.8.17	98.6	46.4	8.8	3.7	46.6	36.1	253.9	233.7
1990.9.4	110.5	54.4	4.3	3.3	19.0	19.5	247.1	216.6
1991.6.7	439.8	105.0	4.4	4.6	154.5	74.5	281.8	179.8
1991.6.21	76.2	31.6	8.9	4.6	152.4	51.4	375.3	298.3
1991.7.3	147.2	77.5	15.6	8.5	95.1	54.1	306.2	240.9
1991.7.18	103.6	34.7	13.4	8.4	91.5	22.7	355.4	291.7
1991.8.1	159.9	68.7	10.8	6.9	67.2	50.8	319.9	314.5
1991.9.4	183.3	63.2	12.1	7.6	95.4	44.0	282.5	229.2
平 均	125.7	51.6	9.6	6.0	81.2	45.4	298.8	235.2
標準偏差	87.1	20.0	3.1	1.7	38.4	14.0	44.5	47.8

41.0%であり、すべての海域で上層より少なくなっている。

この時の透明度は単純に平均して2.7 mであり、下層の照度は上層に比べて著しく低かったと推定される。この照度差が植物プランクトンの上層下層の分布差の最大の要因と考えられる。

上層における動物プランクトンの現存量は、Box 1が  $2.9 \pm 0.4$  tonN, Box 2が  $6.9 \pm 2.2$  tonN, Box 3が  $9.6 \pm 3.1$  tonN, 上層全体が19.4 tonNであり、上層全体に占める割合は、Box 1が14.9%, Box 2が35.6%, Box 3が49.5%となる。

下層における動物プランクトンの現存量は、Box 1が  $2.6 \pm 0.7$  tonN, Box 2が  $5.8 \pm 1.1$  tonN, Box 3が  $6.0 \pm 1.7$  tonN, 下層全体で14.4 tonNであった。Box 1は下層全体の18.0%, Box 2は40.3%, Box 3は41.7%を占めるが、上層の値に比べBox 1とBox 2は高く、Box 3は低い。

上層におけるデトリタスの現存量は、Box 1が  $39.3 \pm 10.9$  tonN, Box 2が  $38.5 \pm 8.9$  tonN, Box 3が  $81.2 \pm 38.4$  tonN, 上層全体で159.0 tonNである。一方、下層は、Box 1が  $19.7 \pm 3.4$  tonN, Box 2が  $33.6 \pm 3.5$  tonN, Box 3が  $45.4 \pm 14.0$  tonN, 下層全体で98.7 tonNである。

これらの値を植物プランクトンと比較すると、デトリタスは上層では植物プランクトンの65~87% (全体で78%), 下層では103~123% (同109%) であり、上層で少なく、下層で多い。これは、下層では植物プランクトンの増殖が制限される上、上層で枯死した植物プランクトンが沈降するためである。

上層におけるDTNの現存量は、Box 1が  $163.2 \pm 97.9$  tonN, Box 2が  $189.9 \pm 68.7$  tonN, Box 3が  $298.8 \pm 87.9$  tonN, 上層全体で651.9 tonNである。標準偏差が大きいのは1989年9月の値による。一方、下層の現存量は、Box 1が  $106.4 \pm 18.0$  tonN, Box 2が  $195.1 \pm 30.9$  tonN, Box 3が  $235.2 \pm 47.8$  tonN, 下層全体で536.7 tonNである。

以上から、夏季の三河湾全体における平均現存量は、植物プランクトンが321.1 tonN, 動物プランクトンが33.8 tonN, デトリタスが257.7 tonN, DTNが1188.6 tonNと推定された。

植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス及びDTNの収支モデル法によって計算された夏季(7~9月)における三河湾の平均的な流量と流速である。

三河湾の流れは、湾口へ流れる上層流、湾奥へ流れる下層流、湾奥の湧昇流、湾口の沈降流という循環流が特徴的であり、しかも、湾口を要として知多湾系と渥美湾

系の2つの循環流が形成される。流速は水平流が1 cm/sec内外、鉛直流が  $10^{-4}$  cm/secオーダーである。なお、伊勢湾との海水の交換量は、三河湾全体の淡水流入量 ( $0.20 \times 10^9$  cm<sup>3</sup>/sec)と比較すると、流出が約6.6倍、流入が約5.6倍に相当する。

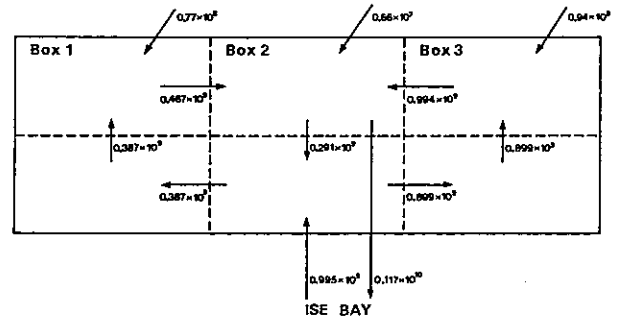


図4-(a) 夏季の三河湾におけるボックス間の平均的な流量 (cm<sup>3</sup>/sec) (1989年7~9月)

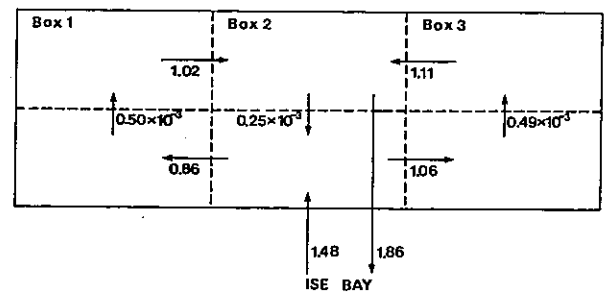


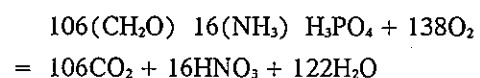
図4-(b) 夏季の三河湾におけるボックス境界面の平均的な流速 (cm/sec) (1989年7~9月)

図5は、ボックスモデル法で計算された夏季の平均的な植物プランクトンの動態である。

植物プランクトンの生産速度は上層では正となり、下層では逆に負となる。即ち、上層では光合成による純生産が被食、枯死、細胞外分泌等の消失をうまわり、下層では逆転する。

上層における植物プランクトンの生産速度は、Box 1が  $36.4$  gN/sec ( $32.2$  mgN/m<sup>2</sup>/day), Box 2が  $1.4$  gN/sec ( $0.8$  mgN/m<sup>2</sup>/day), Box 3が  $57.4$  gN/sec ( $18.6$  mgN/m<sup>2</sup>/day)であった。Box 3における生産速度は湾全体 ( $95.2$  gN/sec) の60%を占め、Box 1でも38%になる。植物プランクトンの殆どが知多湾や渥美湾の湾奥海域で生産され、湾口海域では生産されないことになる。

植物プランクトンの単位面積あたりの生産速度は、知多湾奥が渥美湾奥より高く、前者は後者の2倍弱である。この生産速度は、植物プランクトンの分解と光合成の一般式



からC換算すると、Box 1が229 mgC/m<sup>2</sup>/day、Box 2が5 mgC/m<sup>2</sup>/day、Box 3が152 mgC/m<sup>2</sup>/dayとなる。

下層における植物プランクトンの生産速度は、Box 1が-8.3 gN/sec (-9.2 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 2が-1.9 gN/sec (-1.4 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 3が-19.4 gN/sec (-9.1 mgN/m<sup>2</sup>/day)であり、上層の生産速度が大きいボックスでマイナスも大きい。下層では、植物プランクトンの増殖が小さく、上層や他の海域から沈降あるいは流入した植物プランクトンが消失する量が上回ると考えられる。

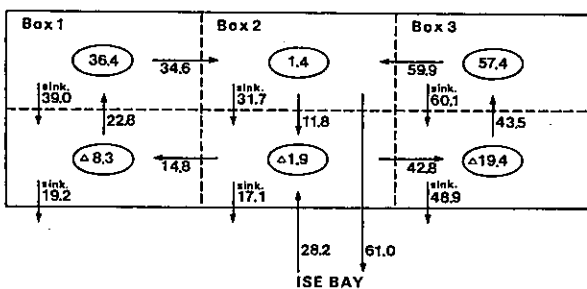


図5 夏季の三河湾における平均的な植物プランクトンの動態 (gN/sec) ○内の数値は生産速度、△は負を示す。

図6は、ボックスモデル法で計算された夏季の三河湾における平均的な動物プランクトンの動態である。

上層における動物プランクトンの生産速度は、Box 1が0.1 gN/sec (0.1 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 2が-1.0 gN/sec (-0.5 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 3が1.9 gN/sec (0.6 mgN/m<sup>2</sup>/day)であり、Box 3が相対的に高い。

下層における動物プランクトンの生産速度は、Box 1が0.7 gN/sec (0.8 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 2が1.6 gN/sec (1.2 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 3が-1.1 gN/sec (-0.5 mgN/m<sup>2</sup>/day)であり、Box 2が高い。

動物プランクトンの動態は、植物プランクトンに比べて値が1桁あるいはそれ以上に小さいうえ、生物化学的過程のウェイトが移流等の物理過程より、かなり小さいのが特徴である。

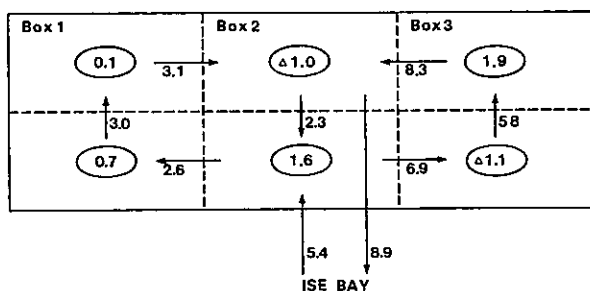


図6 夏季の三河湾における平均的な動物プランクトンの動態 (gN/sec) ○内の数値は生産速度、△は負を示す。

図7は、ボックスモデル法で計算された夏季の三河湾における平均的なデトリタスの動態である。

上層におけるデトリタスの生産速度は、Box 1が26.7 gN/sec (23.6 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 2が38.9 gN/sec (21.0 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 3が38.9 gN/sec (12.6 mgN/m<sup>2</sup>/day)であり、単位面積当たりの生産速度はBox 1とBox 2が高いが、渥美湾奥のBox 3でも他の50%強の速度を持つ。これらの値を植物プランクトンの生産速度と比較すると、Box 1とBox 3は植物プランクトンの生産速度の70%程度であるのに対し、Box 2は26倍にもなる。

下層におけるデトリタスの生産速度は、Box 1のみが負で-16.7 gN/sec (-18.5 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 2が0.6 gN/sec (0.4 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 3が4.0 gN/sec (1.9 mgN/m<sup>2</sup>/day)である。

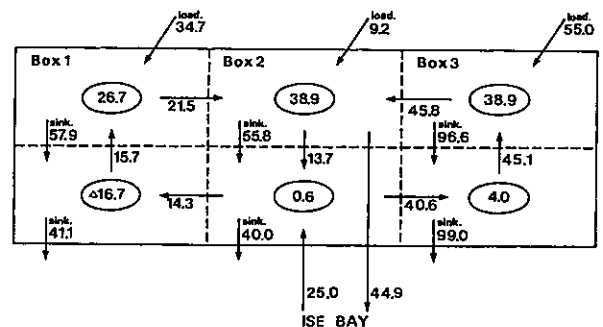


図7 夏季の三河湾における平均的なデトリタスの動態 (gN/sec) ○内の数値は生産速度、△は負を示す。

図8は、ボックスモデル法で計算された夏季の三河湾における平均的なDTNの動態である。

DTNの生産速度は、上層では負となり、下層では正となる。

佐々木ら<sup>1)</sup>、松川<sup>2)</sup>、鈴木、平沢<sup>12)</sup>は三河湾のDTN収支を計算して、湾口の下層は栄養物質の再生の場であると考えた。この計算結果でも湾口の下層はDTNの生産速度が高い。

上層におけるDTNの消失は、植物プランクトンによる栄養塩の取り込みを表し、Box 1が-89.4 gN/sec (-79.0 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 2が-27.4 gN/sec (-14.8 mgN/m<sup>2</sup>/day)、Box 3が-120.2 gN/sec (-39.0 mgN/m<sup>2</sup>/day)である。

下層におけるDTNの生産速度は、水中における再生と海底からの溶出が主体で、湾口のBox 2が高く50.9 gN/sec (37.3 mgN/m<sup>2</sup>/day)であり、次いで知多湾奥のBox 1が19.8 gN/sec (21.9 mgN/m<sup>2</sup>/day)、渥美湾奥のBox 3が21.5 gN/sec (10.0 mgN/m<sup>2</sup>/day)である。

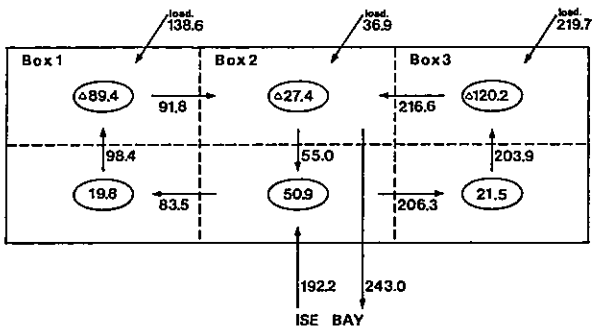


図8 夏季の三河湾における平均的なDTNの動態 (gN/sec) ○内の数値は生産速度, △は負を示す。

これらの値と海底への懸濁物の沈降速度を比較すると、Box 3の懸濁物沈降速度はDTN生産速度をはるかに上回り、この海域で栄養物質の堆積=底質の悪化が進行することを意味する。Box 1はBox 3より差が小さく、Box 2は逆転する。これらの結果は海底表土中のCOD分布 (図9)<sup>13)</sup>とも一致する。

Box 2の底質は悪化していないので、沈降速度に見合う溶出速度があるものと考えられる。溶出速度は、愛知県環境部<sup>14)</sup>によると、湾口域では好気下で36.4 mgN/m<sup>2</sup>/day、嫌気下で102.2 mgN/m<sup>2</sup>/day (Box 2に位置する測

点の単純平均値)である。湾口の底層水は、通常好気的なので好気下の値を用いることができる。海底に沈降する懸濁物が41.8 mgN/m<sup>2</sup>/day、溶出速度が36.4 mgN/m<sup>2</sup>/day、下層におけるデトリタスの生産速度が0.4 mgN/m<sup>2</sup>/dayを勘案すると、下層のDTN生産速度 (37.3 mgN/m<sup>2</sup>/day)のほとんどは、海底からの溶出によると考えられる。

### 考 察

動物プランクトンの現存量を、上層の植物プランクトンと対比すると、Box 1とBox 3が1/10以下 (1:18.3, 1:13.1)、Box 2が1/10以上 (1:6.4)、上層全体ではほぼ1/10 (1:11.4)となる。また、下層では1/10以上 (1:6.8)の現存量となっている。

すなわち、知多湾奥や渥美湾奥では生産者である植物プランクトンに対し一次消費者である動物プランクトンが相対的に少なく、湾口では逆に多い。このことから、次の二つのことが考えられる。

- ① 赤潮の多発と勘案して、湾奥では植物プランクトンは急激な増減を繰り返していて、捕食者である動物プランクトンの増殖が追従できず、植物プランクトンのかなりの部分が補食されることなく、枯死してしまう。

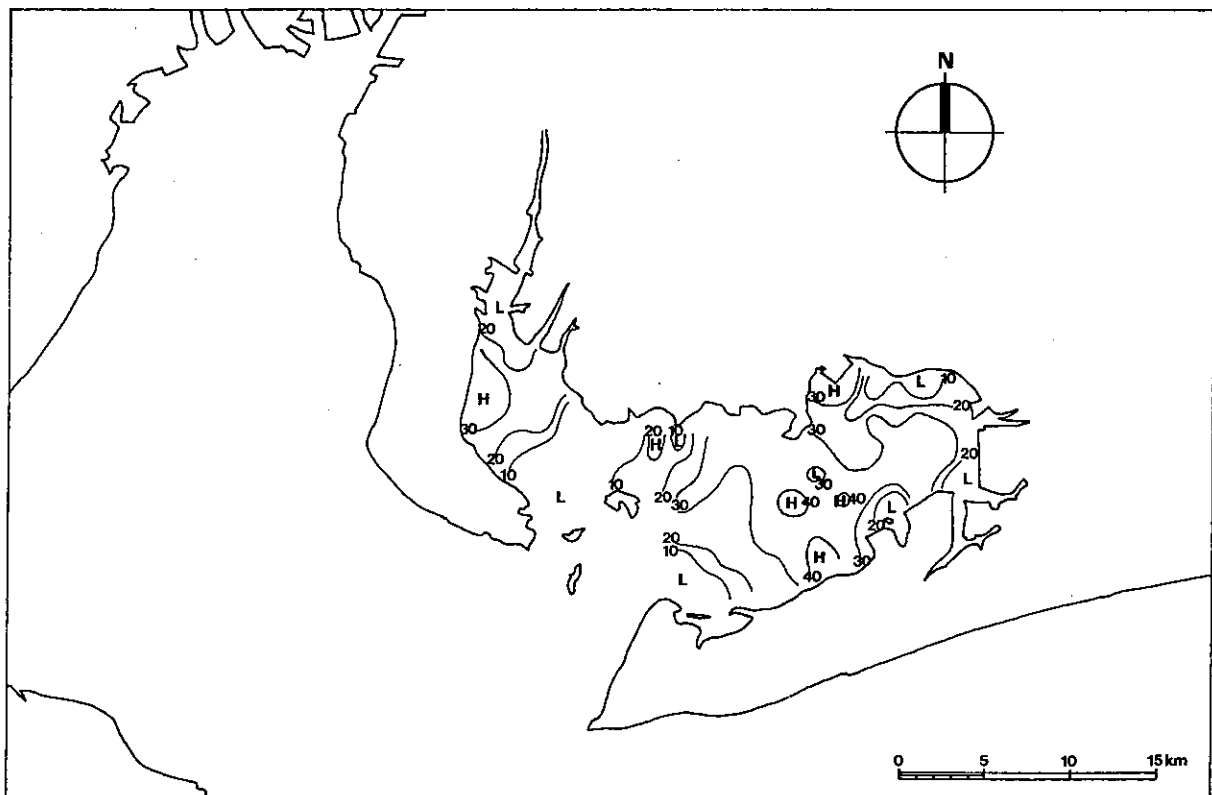


図9 三河湾の海底表土 (0~5cm層) 中のCODの分布 (mg/g) (井野川ら<sup>13)</sup>, 1987年冬季)



② 湾口域と湾奥では動物プランクトンが質的に異なっている。すなわち、湾奥でも植物プランクトン量に見合った動物プランクトンが存在するが、繊毛虫類のように小型で、330 $\mu$ mメッシュのネットを抜けてしまうものが多い。

以上の点を明らかにするためには、1、2日間のタイムスパンで植物プランクトンの増殖開始から、消滅にいたるまでの植物・動物プランクトンの変化を現場でとらえる必要がある。

上・下層における植物プランクトンの現存量の特徴を見ると、海域によっては上層と下層が対応していない。三河湾における上層、下層全体の現存量はそれぞれ223.0 tonN、98.1 tonNであり、各層全体に占める割合は、Box 1が上層23.8%、下層19.5%、Box 2が上層19.8%、下層27.9%、Box 3が上層56.4%、下層52.6%となる。Box 1は上層に比べ下層が相対的に低い。Box 3は同様だが、Box 1程ではない。逆にBox 2は下層の方が高い。

このような上・下層の現存量の特徴はデトリタスにも見られるが三河湾の流動から説明できる。即ち、湾口海域のBox 2では懸濁物が沈降流によって下層へ運ばれるため下層の現存量が相対的に多くなる。また、Box 1はBox 3に比べて湾外水の底層流入が遙かに多いため、Box 1の下層における現存量はBox 3に比べて相対的に少なくなる。<sup>11)</sup>

表5は、三河湾全体におけるNの現存量をまとめたもので、門谷、岡市<sup>15)</sup>が報告した大阪湾についての値も合わせて示した。

これによると、三河湾は、大阪湾に比べPONが多い。中でもデトリタスと植物プランクトンが多いのが特徴である。

このことは、大阪湾より三河湾の方が植物プランクトンの生産効率が良いことを示している。

表5 三河湾・大阪湾におけるNの現存量 (tonN) と全体に占める割合 (%) (大阪湾は門谷<sup>15)</sup>による)

項 目	三河湾		大阪湾	
	(tonN)	(%)	(tonN)	(%)
PON	612.6	34.0	2672	22.0
植物プランクトン	321.1	17.8	1602	13.2
動物プランクトン	33.8	1.9	242	2.0
デトリタス	257.7	14.3	1070	8.8
DTN	1188.6	66.0	9198	76.0
T-N	1801.2	100.0	12128	100.0

表6に各Box毎の単位面積あたりの生産速度を示した。知多湾や渥美湾の奥部上層は植物プランクトンの生産の場と言われているが、<sup>1,2,13)</sup>植物プランクトン生産はDTN消失の40%台に過ぎない。植物プランクトンの純生産はDTNの消失以上だから、光合成によって増殖している植物プランクトンの半分以上は同時に失われ続けることになる。一方、デトリタスの生産速度は、植物プランクトン生産速度の70%前後に達する。

湾口域は懸濁物の沈降とDTNの再生の場と言われているが、そのことは植物プランクトンやデトリタス、DTNの収支からも認められた。また、湾口域は、植物プランクトンの生産速度が小さいにも関わらずデトリタスの生産が大きいことから、湾奥から流入した植物プランクトンが消失する場でもあることが推定される。

湾口下層におけるDTNの再生は、懸濁物の沈降速度とDTNの生産速度が同水準であること、この海域の底質が悪化していないことから、主に海底で行われると考えられる。ただし、谷本ら<sup>16)</sup>は海底境界層において沈降物が海底近くで再懸濁や沈降を繰り返す間に有機物の50~70%が分解すると推定しているため、DTNの再生の場は海底というよりも海底境界層を含む底層と考えるべきであろう。

表6 各要素の単位面積あたりの生産速度 (単位: mgN/m<sup>2</sup>/day)

項 目	上層			下層		
	BOX1	BOX2	BOX3	BOX1	BOX2	BOX3
植物プランクトン	32.2	0.8	18.6	-9.2	-1.4	-9.1
デトリタス	23.6	21.0	12.6	-18.5	0.4	1.9
動物プランクトン	0.1	0.5	0.6	0.8	1.2	0.5
DTN	-79.0	-14.8	-39.0	21.9	37.3	10.0

三河湾は、かつて魚介類の豊富な海として知られていた。しかし、近年では赤潮の多発、貧酸素水塊の発達等によって、漁場価値が低下したばかりでなく、漁業生物の再生産への悪影響が懸念される状態となっている。

筆者らが、今回行った物質収支計算では、三河湾の循環流による収支の特徴の他に、植物プランクトンと動物プランクトン現存量比の海域差がクローズアップされた。

三河湾の富栄養化が、漁業生物へどのような影響を与えているのか明らかにするためには、今後この動物プランクトンへのアプローチが重要であろう。

## 要 約

夏季の三河湾における窒素の収支を PON を 3 区分して検討した。

平均現存量は、植物プランクトンが 282.1 tonN、動物プランクトンが 25.3 tonN、デトリタスが 248.0 tonN、DTN (溶存態総窒素) が 1274.2 tonN となった。これらの構成比を大阪湾と比較すると、植物プランクトンとデトリタスが多く、DTN が少ない。

植物プランクトンは、渥美湾 (三河湾東部) と知多湾 (同西部) の奥部海域上層で生産され、湾口海域では純生産と消失が拮抗して生産はほとんど行われない。また、知多湾奥や渥美湾奥では生産者である植物プランクトン量に対し一次消費者である動物プランクトン量が相対的に少なく、湾口では逆に多かった。このことは、富栄養化海域における低次生産の特徴を表していると考えられ、今後の動物プランクトンに対するアプローチの重要性を示唆している。

植物プランクトンの生産は DTN 消失の 40% 程度しかなく、光合成で生産される植物プランクトンの半分以上は同時に失われ続けていることになった。

この植物プランクトンの消失に関しても上記動物プランクトンの関与が重要であり、1, 2 日の短いタイムスケールでの植物・動物プランクトン現場調査が必要である。

## 文 献

- 佐々木克之, 松村皐月, 松川康夫, 鈴木輝明: 三河湾の夏季の海水交換と窒素の循環. 沿岸海洋研究ノート, Vol. 17, 99-107(1980).
- 松川康夫: 内湾域における物質輸送機構と窒素, 磷の収支と循環に関する研究. 中央水産研究所研究報告, 第1号, 1-74(1989).
- 西條八束: 伊勢湾および三河湾の概況, 「内湾の環境科学—三河湾・伊勢湾の研究を中心として」(西條八束編), 上巻, 培風館, 東京, 1984, pp.1-37.
- 半田暢彦: 懸濁態有機物の動態, 「内湾の環境科学—三河湾・伊勢湾の研究を中心として」(西條八束編), 下巻, 培風館, 東京, 1984, pp.1-29.
- 松川康夫: ボックスモデルによる内湾の物質収支の解析法. 内湾底泥をめぐる物質収支の動態解明に関する研究 5 年間の研究成果 (東海区水産研究所, 養殖研究所, 南西海区水産研究所, 水産大学校), 149-157(1983).
- 鈴木輝明: 負荷量の算定法. 内湾底泥をめぐる物質収支の動態解明に関する研究 5 年間の研究成果 (東海区水産研究所, 養殖研究所, 南西海区水産研究所, 水産大学校), 143-148(1983).
- T. J. Smayda and B. J. Baleyn: Experimental observations on the flotation of marine diatoms—II. *Skeletonema costatum* and *Rhizosolenia setigera*. *Limnol Oceanogr*, Vol. 11, 18-34(1966).
- 山本民次, 土屋晴彦: 平成元年伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況, 愛知県水試研究業績 C 集第 80 号, 愛知県水産試験場, 1990, pp.1-15.
- 山本民次, 石田基雄: 平成 2 年伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況, 愛知県水試研究業績 C 集第 84 号, 愛知県水産試験場, 1991, pp.1-13.
- 坂口泰治, 石田基雄: 平成 3 年伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況, 愛知県水試研究業績 C 集第 88 号, 愛知県水産試験場, 1992, pp.1-15.
- 松川康夫: 内湾における窒素, 磷の挙動. 沿岸海洋研究ノート, Vol. 28, 43-48(1990).
- 鈴木輝明, 平澤康弘: 夏季成層期 (4 月~10 月) における三河湾の DTN (溶存態総窒素) 及び DO (溶存酸素) 収支に関する研究, 昭和 59 年度赤潮予察実用化技術開発試験報告書, 愛知県, 1985, pp. 11-19.
- 井野川伸男, 平澤康弘, 蒲原聡, 岡田元: 三河湾採泥調査, 平成元年度愛知県水産試験場業務報告, 愛知県水産試験場, 1990, pp. 203-206.
- 愛知県環境部: 三河湾栄養塩類溶出実態調査結果, 1991, pp. 23-34.
- 門谷茂, 岡市友利: 大阪湾, 播磨灘の C, N, P 循環におけるプランクトンの役割, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 25, 158-164(1987).
- 谷本照己, 川名吉一朗, 塩沢孝之, 星加幸: 海底境界域における沈降・再懸濁, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 28, 25-33 (1990).