— 論 文 —

東京湾における窒素とリンの収支 *

松村 剛[†]・石丸 隆[‡]・柳 哲雄^{**}

要 旨

東京湾における窒素とリンの収支を、各月の観測データをもとにボックスモデルを用いて見積もった。上層における DIN (溶存無機態窒素), $\text{PO}_4\text{-P}$ (リン酸態リン) の消費は、ともに成層期に大きく、混合期に小さかった。下層における DIN の生産は成層期に小さく、混合期にやや大きいが、一方 $\text{PO}_4\text{-P}$ の生産は成層期に大きく、混合期に小さかった。海底への TN (全窒素), TP (全リン) の堆積は両者とも成層期に大きく混合期に小さい傾向を示すが、TP の堆積は TN に見られるほど大きくはなかった。また、陸上からの DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ の負荷に対する下層の生産は、周年平均でそれぞれ 48%, 146% であり、特に $\text{PO}_4\text{-P}$ で大きかった。以上のような窒素とリンの挙動の相違は、成層期に $\text{PO}_4\text{-P}$ が海底から溶出することに起因すると考えられる。

キーワード：東京湾、ボックスモデル、窒素・リン収支

1. はじめに

東京湾は関東平野南部の中央に位置し、房総半島の洲崎と三浦半島の剣崎を結んだ線の北側に存在する水域面積約 1,500 km^2 、容積 18 km^3 の海域と定義されている (貝塚, 1993)。また一般的に、千葉県側の富津岬と神奈川県側の観音崎を結んだ線を境に、北側の海域を「東京内湾」あるいは「内湾部」、南側の海域を「東京外湾」、「東京湾口」あるいは「浦賀水道」と呼んで区別される (例えば; 宇野木・岸野, 1977)。

外湾は水深が浅い東側の富津周辺を除いて、海岸線から急激に水深が深くなり、さらに湾軸は急斜面で相模湾へとつながっている。外湾の最大水深は 800 m 以

上であり、湾の入口は 20 km と広く外洋との海水交換もよい。これに対して内湾部は、平均水深は約 15 m と浅く、水域面積は約 960 km^2 、容積は約 15 km^3 であり、奥ゆきがあるが入口は幅 6 km と狭く閉鎖的な海域となっている (鎌谷, 1993; 土屋・森, 1995; 風呂田, 1997; 野村, 1998)。

東京湾の周辺には東京、横浜、千葉などの大都市が集中し、約 2,600 万の人たちが住んでいる。また、湾岸には京浜、京葉の大工業地帯が発達している。これらの人間活動により東京湾へ過剰に流入する窒素・リンは、東京湾の環境に非常に大きな影響を与えており、現在では世界で最も富栄養化した内湾となっており (Ishimaru, 1991)、赤潮の発生は夏季に限らず冬季にも見られる (山口・有賀, 1988)。また、夏季には湾奥部中央の底層において毎年のように貧酸素水塊が形成され、成層期末期には貧酸素水塊が湾奥部沿岸に湧昇することにより、青潮を引き起こす (風呂田, 1997)。これらの富栄養化に伴う現象は、現在でもなお盛んに行われている東京湾の水産業に被害を及ぼすばかりでなく、景観を著し

*2001 年 10 月 2 日 受領; 2002 年 8 月 22 日 受理

著作権: 日本海洋学会, 2002

[†]東京水産大学海洋環境学科

〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7

現在: 財団法人愛知県水産業振興基金栽培漁業部

〒441-3615 愛知県渥美郡渥美町大字中山字一膳松 1-3

e-mail: matsumu@do8.enjoy.ne.jp

[‡]東京水産大学海洋環境学科

^{**}九州大学応用力学研究所; 〒816-8580 春日市春日公園 6-1

く損ね、海水浴、釣りなどの湾岸住民のリクリエーション活動にも悪影響を及ぼすものである。

2004 年度を目標年次とする第 5 次水質総量規制では、COD に加えて新たに窒素・リンを規制対象としている(東京都環境科学研究所, 2000)。これにより、窒素・リンの負荷が削減され、湾内の栄養塩濃度が低下し COD の内部生産が抑制され、東京湾の有機汚濁が軽減することが期待される。削減の効果を評価するためには現状での湾内における窒素・リンの循環や収支を明らかにしておく必要がある。

東京湾では Matsukawa and Sasaki (1990) や魚 (1994) が窒素収支の解析を行っているが、リンについて解析した例はない。しかし、硝酸態窒素や亜硝酸態窒素は脱窒素により分子状窒素に変換され大気中に散逸し、リン酸は貧酸素水塊が形成されると底質から大量に溶出するなど、窒素とリンで異なる挙動を示すことがある。本研究は 1 年間の観測データをもとにボックスモデル解析を用い、窒素とリンの挙動や収支を解析し、両者を比較した。

2. 方法

2.1. 観測, 採水および試料の分析

観測は 1998 年 3 月から 1999 年 3 月までの毎月 1 回、Fig. 1 に示す 11 測点で行った。ただし、海況や航海日程の関係で全点で観測をできない月もあった。特に観測点数が少なかった月については、東京都、千葉県、神奈川県 の公共用水域の水質測定データを用い補完した(測点は Fig. 1 に示す)。また、観測は可能な限り全点を 2 日以内に行ったが、1999 年 3 月は連続した 2 日間では観測が行えず、内湾部と浦賀水道の観測との間に 5 日の間を置いた。

全ての測点で CTD を用いて水温、塩分の計測を行った。また、Fig. 1 に●印で示した測点では CTD に取りつけたロゼットマルチサンプラー、バンドン採水器および表面採水バケツで、3~7 層の採水を行った。得られた試水について、各態の窒素・リンを定量した。PON(懸濁態有機窒素) はあらかじめ電気炉中で 450°C で 3 時間焼いた GF/F フィルターを用いて試水 100~200 ml を濾過し、捕集した粒子を CHN コーダー(Yanaco 社

Fig. 1. Observation points in Tokyo Bay. Closed circles show locations where CTD observation and water sampling are conducted by T/S Seiyō-Maru. Open squares show locations where only CTD observation is conducted by T/S Seiyō-Maru. Open triangles show observation points by Tokyo metropolitan, Chiba prefecture, and Kanagawa prefecture. Broken lines show cross-sections of box model.

製 MT-3) で分析した。このとき同時に POC (懸濁態有機炭素) の測定を行った。ただし、1998 年 10 月は PON, POC が欠測となったので、1998 年 4 月~1999 年 4 月の間に得られた PON, POC, PP (懸濁態リン) の全データより、PON と PP, POC と PP の回帰式を求め、1998 年 10 月の PP 濃度から換算した値を PON, POC 濃度とした。PON サンプルを濾過したときの濾液は凍結保存し、NO₃-N (硝酸態窒素), NO₂-N (亜硝酸態窒素), NH₄-N (アンモニア態窒素), TDN (全溶存態窒素), PO₄-P (リン酸) の分析に用いた。NO₂-N は Technicon のマニュアル (1978) に従い、NO₃-N は Cu-Cd カラムで還元し NO₂ と同じ方法で、また NH₄-N は Yu *et al.* (1994) のサリチル酸ナトリウム、ジクロロイソシアニル、ニトロプルシドを用いる方法で、

それぞれオートアナライザーを用いて分析した。TDN は試水を Solòrzano and Sharp (1980) の方法で湿式酸化後、 NO_3 と同じ方法で定量した。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は Murphy and Riely (1962) の方法で分光光度計 (島津製作所製 UV-120 および UV-1200) を用いて測定を行った。TP (全リン) は海水を濾過せずそのまま凍結保存し、解凍後、Menzel and Corwin (1965) の方法に従い湿式酸化を行い、 $\text{PO}_4\text{-P}$ と同様の方法で定量した。DIN (溶存無機態窒素) は NO_3 、 NO_2 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の和により、TN (全窒素) は TDN と PON の和により濃度を求めた。

2.2. ボックスモデル

東京湾を Fig. 1 に示すように、宇野木、岸野 (1977) とほぼ同様に、川崎と木更津、観音崎と富津岬、剣崎と洲崎を結んだ線で3つの海域に分け、それぞれ北側から湾奥、湾央、湾口とした。宇野木、岸野 (1977) の区分に従った理由としては、川崎-木更津以北の海域では夏季に顕著な貧酸素水塊が形成され (青木, 1999)、以南の海域とは環境が異なることと、「はじめに」で述べたように観音崎-富津岬以南では外洋的な環境となることが挙げられる。

Fig. 2 に湾奥 (Sta. F3)、湾央 (Sta. F6) における夏季 (1998 年 7 月) および冬季 (1999 年 2 月) の水温、塩分、TN、DIN、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の鉛直分布を示す。両測点とも 7 月には 7.5 m 層付近を中心に顕著な躍層が見られ、また 2 月においても夏季よりも弱い躍層が見られる。そこで本研究では全ての海域を周年上層と下層に分け、Box 1 (湾奥上層)~Box 6 (湾口下層) の計 6 つの Box を設定し (Fig. 3)、境界面は夏季に強い躍層が見られた 7.5 m とした。躍層の深度は季節により変動し、冬季には躍層は夏季よりもやや深いところに見られるが、宇野木 (1998) は 2 層のボックスモデルを用いて鉛直循環流量を求めた際、上下層の境界面を 5 m としても 10 m としても結果は critical に変わらないと述べている。湾口付近では水深が 50 m を超える場所が見られるが、その場合の深度は 50 m までとした。水深が浅い内湾との物質収支を考慮しているからである。各 Box の諸元には Table 1 に示す値を用いた。また、Fig. 3 に示したような移流、拡散を想定した。

各 Box における水、塩分の保存式は、以下のように

Fig. 2. Vertical distributions of water temperature, salinity, nitrogen and phosphorus.

表される。

① Box 1

$$A_{13}U_{13} = A_{12}W_{12} + Q_{w1} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_1 \frac{dS_1}{dt} + A_{13}U_{13} \frac{S_1 + S_3}{2} - A_{13}K_{H13} \frac{S_3 - S_1}{L_{13}} \\ = A_{12}W_{12} \frac{S_1 + S_2}{2} + A_{12}K_{V12} \frac{S_2 - S_1}{L_{12}} \end{aligned} \quad (2)$$

Table 1. Dimensions of boxes in Tokyo Bay. V_i is the volume of Box i . A_{ij} is the area between Box i and Box j . L_{ij} is the distance between Box i and Box j . Vertical distances are treated as half of the average depth of each region. Horizontal distances are treated as the distance between centers of two adjacent boxes.

	Name	Value
Volume ($\times 10^9 \text{ m}^3$)	V_1	3.39
	V_2	3.07
	V_3	2.95
	V_4	5.69
Sea Surface Area (km^2)	A_{1S}	502
	A_{3S}	425
Interface Area (km^2)	A_{12}	391
	A_{34}	357
Cross Section Area (km^2)	A_{13}	0.09
	A_{24}	0.19
	A_{35}	0.05
	A_{46}	0.17
Vertical Distance (m)	L_{12}	8
	L_{34}	14
Horizontal Distance (km)	L_{13}	24
	L_{24}	22
	L_{35}	22
	L_{46}	23

② Box 2

$$A_{12}W_{12} = -A_{24}U_{24} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_2 \frac{dS_2}{dt} + A_{12}W_{12} \frac{S_1 + S_2}{2} + A_{12}K_{V12} \frac{S_2 - S_1}{L_{12}} \\ = -A_{24}U_{24} \frac{S_2 + S_4}{2} + A_{24}K_{H24} \frac{S_4 - S_2}{L_{24}} \end{aligned} \quad (4)$$

③ Box 3

$$A_{35}U_{35} = A_{13}U_{13} + A_{34}W_{34} + Q_{w3} \quad (5)$$

Fig. 3. Horizontal and vertical divisions of box model and name of each box.

$$\begin{aligned} V_3 \frac{dS_3}{dt} + A_{35}U_{35} \frac{S_3 + S_5}{2} - A_{35}K_{H35} \frac{S_5 - S_3}{L_{35}} \\ = A_{13}U_{13} \frac{S_1 + S_3}{2} - A_{13}K_{H13} \frac{S_3 - S_1}{L_{13}} \\ + A_{34}W_{34} \frac{S_3 + S_4}{2} + A_{34}K_{V34} \frac{S_4 - S_3}{L_{34}} \end{aligned} \quad (6)$$

④ Box 4

$$-A_{24}U_{24} + A_{34}W_{34} = -A_{46}U_{46} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_4 \frac{dS_4}{dt} - A_{24}U_{24} \frac{S_2 + S_4}{2} + A_{24}K_{H24} \frac{S_4 - S_2}{L_{24}} \\ + A_{34}W_{34} \frac{S_3 + S_4}{2} + A_{34}K_{V34} \frac{S_4 - S_3}{L_{34}} \\ = -A_{46}U_{46} \frac{S_4 + S_6}{2} + A_{46}K_{H46} \frac{S_6 - S_4}{L_{46}} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 A_{ij} は Box i - j 間の境界の面積、 U_{ij} は Box i - j 間の水平流速、 W_{ij} は Box i - j 間の鉛直流速、 Q_{wi} は Box i への淡水流入量、 V_i は Box i の容積、 S_i は Box i の平均塩分、 dS_i/dt は Box i における観測月間の平均塩分の時間変化、 K_{Hij} は Box i - j 間の水平拡散係数、 K_{Vij} は Box i - j 間の鉛直拡散係数、 L_{ij} は Box i - j 間の距離である。 L_{12} 、 L_{34} はそれぞれ湾奥部、湾中央部の平均水深の半分とし、 L_{13} 、 L_{24} 、 L_{35} 、 L_{46} は隣り合う Box の中心間の距離とした。Box 1~4 について、水、塩分の保存式は 8 個できるが、未知数は U_{13} 、 U_{24} 、 U_{35} 、 U_{46} 、 W_{12} 、 W_{34} 、 K_{H13} 、 K_{H24} 、 K_{H35} 、 K_{H46} 、 K_{V12} 、 K_{V34} の 12 個と多くなる。そこで、各 Box 間の K_{Hij} は鉛直的に変わらないものとした ($K_{H13} = K_{H24}$ 、

$K_{H35} = K_{H46}$)。水平拡散係数は主に潮流により支配されており潮流流速の2乗に比例することから(谷本ら, 2001), K_{H35} は K_{H13} に湾央-湾口間と湾奥-湾央間の潮流振幅の比の2乗を乗じた値とした。潮流振幅の値として, 宇野木ら(1980)を用いると(湾奥-湾央間平均 12.9 cm s^{-1} , 湾央-湾口間平均 31.8 cm s^{-1}), $K_{H35} = 6.02 \times K_{H13}$ となった。鉛直拡散係数は密度勾配に反比例し(谷本ら, 2001), また密度勾配は湾奥の Box 1-2 間で最も大きくなると考えられるため, 湾央の鉛直拡散係数 K_{V34} は, K_{V12} を Box 3-4 間と Box 1-2 間の密度勾配の比で割った値を用いた。以上の操作により未知数を8個に減らして, 水量, 塩分の保存式を8元1次連立方程式として解き, 各 U_{ij} , W_{ij} , K_{Hij} , K_{Vij} を求めた。

各 Box における DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ の収支は, 以下の式で表される。

① Box 1

$$P_1 = -Q_{DX1} + V_1 \frac{dC_{DX1}}{dt} + A_{13}U_{13} \frac{C_{DX1} + C_{DX3}}{2} - A_{13}K_{H13} \frac{C_{DX3} - C_{DX1}}{L_{13}} - A_{12}W_{12} \frac{C_{DX1} + C_{DX2}}{2} - A_{12}K_{V12} \frac{C_{DX2} - C_{DX1}}{L_{12}} \quad (9)$$

② Box 2

$$P_2 = V_2 \frac{dC_{DX2}}{dt} + A_{24}U_{24} \frac{C_{DX2} + C_{DX4}}{2} - A_{24}K_{H24} \frac{C_{DX4} - C_{DX2}}{L_{24}} + A_{12}W_{12} \frac{C_{DX1} + C_{DX2}}{2} + A_{12}K_{V12} \frac{C_{DX2} - C_{DX1}}{L_{12}} \quad (10)$$

③ Box 3

$$P_3 = -Q_{DX3} + V_3 \frac{dC_{DX3}}{dt} - A_{13}U_{13} \frac{C_{DX1} + C_{DX3}}{2} + A_{13}K_{H13} \frac{C_{DX3} - C_{DX1}}{L_{13}} + A_{35}U_{35} \frac{C_{DX3} + C_{DX5}}{2} - A_{35}K_{H35} \frac{C_{DX5} - C_{DX3}}{L_{35}} - A_{34}W_{34} \frac{C_{DX3} + C_{DX4}}{2} - A_{34}K_{V34} \frac{C_{DX4} - C_{DX3}}{L_{34}} \quad (11)$$

④ Box 4

$$P_4 = V_4 \frac{dC_{DX4}}{dt} - A_{24}U_{24} \frac{C_{DX2} + C_{DX4}}{2} + A_{24}K_{H24} \frac{C_{DX4} - C_{DX2}}{L_{24}} + A_{46}U_{46} \frac{C_{DX4} + C_{DX6}}{2}$$

$$- A_{46}K_{H46} \frac{C_{DX6} - C_{DX4}}{L_{46}} + A_{34}W_{34} \frac{C_{DX3} + C_{DX4}}{2} + A_{34}K_{V34} \frac{C_{DX4} - C_{DX3}}{L_{34}} \quad (12)$$

ここで, P_i は Box i における DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ の生産, Q_{DXi} は Box i における DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ の負荷, C_{DXi} は Box i における平均 DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度, dC_{DXi}/dt は Box i における平均 DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の観測月間の時間変化である。生産は植物プランクトンなどによる取り込みが盛んな場合には負の値を示し, バクテリアや動物プランクトンによる再生, 海底から水柱への回帰や溶出が盛んな場合には正の値を示す。

各 Box における TN, TP の収支は, 以下の式で表される。

① Box 1

$$D_1 = Q_{TX1} - V_1 \frac{dC_{TX1}}{dt} - A_{13}U_{13} \frac{C_{TX1} + C_{TX3}}{2} + A_{13}K_{H13} \frac{C_{TX3} - C_{TX1}}{L_{13}} + A_{12}W_{12} \frac{C_{TX1} + C_{TX2}}{2} + A_{12}K_{V12} \frac{C_{TX2} - C_{TX1}}{L_{12}} \quad (13)$$

② Box 2

$$D_2 = D_1 - V_2 \frac{dC_{TX2}}{dt} - A_{24}U_{24} \frac{C_{TX2} + C_{TX4}}{2} + A_{24}K_{H24} \frac{C_{TX4} - C_{TX2}}{L_{24}} - A_{12}W_{12} \frac{C_{TX1} + C_{TX2}}{2} - A_{12}K_{V12} \frac{C_{TX2} - C_{TX1}}{L_{12}} \quad (14)$$

③ Box 3

$$D_3 = Q_{TX3} - V_3 \frac{dC_{TX3}}{dt} + A_{13}U_{13} \frac{C_{TX1} + C_{TX3}}{2} - A_{13}K_{H13} \frac{C_{TX3} - C_{TX1}}{L_{13}} - A_{35}U_{35} \frac{C_{TX3} + C_{TX5}}{2} + A_{35}K_{H35} \frac{C_{TX5} - C_{TX3}}{L_{35}} + A_{34}W_{34} \frac{C_{TX3} + C_{TX4}}{2} + A_{34}K_{V34} \frac{C_{TX4} - C_{TX3}}{L_{34}} \quad (15)$$

④ Box 4

$$D_4 = D_3 - V_4 \frac{dC_{TX4}}{dt} + A_{24}U_{24} \frac{C_{TX2} + C_{TX4}}{2} - A_{24}K_{H24} \frac{C_{TX4} - C_{TX2}}{L_{24}} - A_{46}U_{46} \frac{C_{TX4} + C_{TX6}}{2} + A_{46}K_{H46} \frac{C_{TX6} - C_{TX4}}{L_{46}} - A_{34}W_{34} \frac{C_{TX3} + C_{TX4}}{2} - A_{34}K_{V34} \frac{C_{TX4} - C_{TX3}}{L_{34}} \quad (16)$$

ここで、 D_i は Box i における TN, TP の沈降、堆積 (窒素の場合は脱窒素を含む)、 Q_{TXi} は Box i における TN, TP の負荷、 C_{TXi} は Box i における TN, TP の平均濃度、 dC_{TXi}/dt は Box i における平均 TN, TP 濃度の観測月間の時間変化である。沈降、堆積は、正の場合は上層の Box から下層の Box への沈降、下層の Box から海底への堆積を、負の場合は海底での再生による水柱への回帰、溶出、堆積物の巻き上げを意味する。

東京湾への流入負荷については、松村 (投稿準備中) が 1997, 98 年度の各月の内湾部へ流入している河川、内湾部または河口に処理水を放流している下水処理場、湾岸の工場からの淡水、窒素・リンの負荷を算出している。本研究の各式の負荷 Q_i は、その元データより、前月の観測日から当月の観測日の間の負荷を計算し用いた。

各 Box における平均塩分は CTD による 1 m ごとの観測値について、平均窒素、リン濃度は観測で得られた各層のデータについて、まず測点ごとに水柱の加重平均を求め、次にそれらを Box 内で算術平均し求めた。

3. 結果と考察

3.1. 淡水流入量および窒素・リン負荷量

Fig. 4 に前月と当月の観測日間の淡水流入量および窒素、リン負荷量を示す。淡水、窒素、リンともに大河川の流入が多い Box 1 に、全負荷の約 8 割が集中している。季節的には、負荷は 4~11 月にかけて、特に 8~10 月に多く、11~3 月にかけて少なくなる変動を示した。また、窒素・リンともに 8 割前後が溶存無機態 (DIN, PO_4 -P) で流入していた。

3.2. 各 Box における塩分および窒素・リン濃度の変動

3.2.1. 塩分

Fig. 5 に各 Box における平均塩分の季節変動を示す。塩分はいずれの月も湾奥上層で最も低く、湾口下層で最も高かった。上層の塩分は、4 月から 10 月にかけてし

Fig. 4. Variations of fresh water, nitrogen and phosphorus loads to Tokyo Bay from April 1998 to March 1999.

だいに低下したが、11 月には急激に上昇し、特に Box 1, 3 での 10 月から 11 月への変動幅は約 5 であった。11 月以降は比較的高い値で推移した。このような変動は淡水流入量の変動によく対応している (Fig. 4)。一方、下層の塩分は、8 月に Box 2 でやや低くなったが、周年高い値でほぼ安定していた。そのため、上層と下層の塩分差は、4 月から 10 月にかけて大きく、11 月から 3 月にかけて小さかった。

なお、5, 10 月は平均塩分値をそのまま用いて計算を行うと、 K_H が負の値を示した。Box 5 の塩分が前の月より急に低下したためと思われる。また、8 月は荒天のため、湾口では内湾部に近い測点でしか観測ができず、他の月に比べて Box 5 の塩分が極端に低くなった。やむを得ず、以上の 3 つの月 (5, 8, 10 月) の Box 5 の塩分については、それぞれ前後の月の塩分の平均値を用いて計算を行った結果、正の K_H を得ることができたので、以下の解析ではその値を用いる。

Fig. 5. Month-to-month variation of average salinity in each box.

3.2.2. DIN, TN, $\text{PO}_4\text{-P}$, TP 濃度

各 Box における平均 DIN, TN 濃度の変動を Fig. 6 に示す。DIN は上下層とも同様の変動を示した。湾口では春季～夏季に若干濃度が低下するが、周年 $10 \mu\text{M}$ 前後の濃度であった。しかし内湾部では、3, 4 月に高かった濃度が 5 月には急激に低下し、9 月まで低濃度であった。これは植物プランクトンによる DIN の取り込みが盛んになるためと考えられる。10 月に DIN 濃度が急激に高くなるのは、9～10 月の降水量が多く、河川からの負荷量が大きかったため (Fig. 4) と考えられる。それ以降負荷は小さくなるにもかかわらず、再び高い濃度で推移した。Matsukawa and Sasaki (1990) (上下層の境界は 10 m) は、周年上層のほうが DIN 濃度が高いと述べているが、本研究では成層期には下層のほうが濃度が高くなる傾向が見られた。また、Matsukawa and Sasaki (1990) は下層の DIN 濃度は周年湾央のほうが高いと述べているが、魚 (1994) (上下層の境界は湾奥は 6 m, 湾央は 20 m) は 8 月以外は湾奥のほうが高いとしている。本研究の結果では、湾央下層のほうが DIN 濃度が高かったのは 8 月のみであり、魚 (1994) の結果と同様であった。

TN 濃度は各 Box の上下層ともに同様の変動を示しており、このことは DIN と同様である。DIN が植物プランクトンに取り込まれ濃度が低下しても、PON の形態になるだけなので TN としては濃度は大きく変化しない。湾口の TN 濃度は周年 $20\sim30 \mu\text{M}$ であるが、DIN とは異なり成層期にやや濃度が高い傾向を示した。湾内では 4 月から 5 月にかけて急に濃度が低下した。5

Fig. 6. Month-to-month variations of average DIN (upper) and TN (lower) concentration in each box.

月以降は、多少の変動はあるが、濃度は緩やかに上昇していく傾向が見られた。

各 Box における $\text{PO}_4\text{-P}$, TP 濃度の変動を Fig. 7 に示す。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は上層では 5, 7 月にやや濃度が低下するが、DIN で見られるような春季～夏季の大幅な低下は示さない。8 月から上層の濃度は上昇し、10～12 月に最も濃度が高くなった。一方、下層の濃度変動は海域により差が見られた。Box 2 では 3 月以降濃度が上昇して 8 月にピークに達し、9 月に濃度が低下するが 12 月まで $1.5 \mu\text{M}$ 程度で推移し、1 月以降は $1 \mu\text{M}$ 以下に低下した。Box 4 では、8 月に濃度は一時的に $2 \mu\text{M}$ 近くに達するが、4 月から 12 月にかけて約 $1 \mu\text{M}$ で、1 月以降は $1 \mu\text{M}$ 以下で推移した。湾口の Box 6 では変動は小さかった。

以上のような $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度変動パターンは DIN とは大きく異なり、夏季に湾内下層で高濃度となり、上層でもそれほど濃度が低下しない。これは夏季の貧酸素化により底質から $\text{PO}_4\text{-P}$ が水柱に溶出することによって考えられる。また、冬季に低濃度になるのは流入負荷が減少することと珪藻の増殖による取り込みが考えられる (松村ら, 2001)。

TP は湾口部では TN 同様、夏季に濃度がやや高くなるが周年大きな変動は示さない。これに対して、湾内

Fig. 7. Same as Fig. 6 but for $\text{PO}_4\text{-P}$ (upper) and TP (lower).

ではTNとは逆の変動を示し、上層では9月を中心に、下層では3～8月にかけて濃度が高くなる。これは、底質からの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出がTP濃度に反映するためと考えられる。

なお、物質収支の計算をするときには塩分と同様に、Box 5の5, 8, 10月の各窒素、リン濃度は前後の月の平均値を用いた。

3.3. 窒素・リンの収支

3.3.1. 計算された流速および拡散係数

計算により求められた各月のBox間の流速および拡散係数の値をTable 2に示す。水平流速 U_{ij} はほぼ周年にわたり、上層では湾外への流出、下層では流入を示した。湾奥-湾中央間と湾中央-湾口間の流速とを比較すると、上層では湾中央-湾口間の U_{35} のほうが大きい値を示すことが多かったが、下層では U_{24} と U_{46} を比べて大きな差は見られなかった。鉛直流速は湾奥の W_{12} では周年上昇流となったが、湾中央部の W_{34} は下降流を示すことがあり、特に成層が弱くなる時期にその傾向が強かった。

11月には全ての U , W が、1月には湾奥-湾中央間の U , 全ての W および K_V に極端な値が見られた(Table 2)。11月の異常な流速は10月から11月にかけて塩分

が急激に上昇したことにより算出されたと考えられる。また、1月については観測を18, 19日に行ったが、その前数日間の「東京湾口海況図」(神奈川県水産総合研究所, 千葉県水産試験場富津分場, 1999)を見ると、12日には洲崎沖にあった水温 17°C の水塊が13日には金谷沖へと急激に北上しており、さらに15日にかけて竹岡沖に達している。このような暖水の急接近が湾内の海洋構造に影響を与え、1月の流速の計算結果に影響を与えたのかもしれない。このような特異的な値は年変動の平均像を見る上では除外したほうがよいと考えられるので、これ以降は11, 1月の結果については除外して議論を行うこととする。

4～10月を成層期, 12～3月を混合期として両者をそれぞれ平均して比較すると(11, 1月のデータは除外), 湾奥-湾中央間の流速 U_{13} と U_{24} は上下層とも混合期のほうが大きく、湾中央-湾口間の流速 U_{35} と U_{46} は成層期と混合期でほとんど変わらない結果となった。鉛直流速は湾奥の W_{12} は混合期が大きかった。また、 W_{34} の平均値は成層期は上昇流となっているが、混合期には沈降流となっており、周年で平均すると $-0.55 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ であり、沈降流となった。

Matsukawa and Sasaki (1990) および魚 (1994) で求められた平均流速と本研究の結果を比較してみる(Table 3)。本研究で見積もられた水平流速は、湾奥-湾中央間上層の値は大きめであり、湾中央-湾口間下層の値は小さめであるが、Matsukawa and Sasaki (1990) や魚 (1994) の結果でも、湾奥-湾中央間上層で 10 cm s^{-1} を超える値や湾中央-湾口間下層で流向が湾外向きを示していることもある。

湾中央の沈降流はMatsukawa and Sasaki (1990) や魚 (1994) のボックスモデルの結果ではほとんど見られない。しかし、Guo and Yanagi (1995) は冬季の北風による吹送流を3次元数値モデルを用いて調べた結果、湾口寄りの西岸に沈降流があることを示しており、また夏季についてはあるが、蔵本・中田 (1991) は数値モデルの結果より、北東風のケース(この風向の風は冬季に卓越する; 宇野木・岸野, 1977)に湾中央部に顕著な沈降流が見られると述べている。従って、冬季湾中央部には本研究で認められたような沈降流が定在していると考えられる。

Table 2. Calculated values of velocity and dispersion coefficient between each box. Mean values are calculated without those of November and January.

	U_{13}	U_{24}	U_{35}	U_{46}	W_{12}	W_{34}	K_{H13}	K_{V12}
	cm sec ⁻¹				$\times 10^{-3}$ cm sec ⁻¹		$\times 10^5$ cm ² sec ⁻¹	cm ² sec ⁻¹
Apr	6.2	-2.7	10.7	-2.6	1.3	-0.15	9.9	1.1
May	5.4	-2.3	14.0	-3.4	1.1	0.47	9.4	0.7
Jun	6.6	-2.9	5.0	-1.0	1.4	-1.00	14.8	0.9
Jul	4.2	-1.7	13.3	-3.2	0.8	0.65	2.7	0.5
Aug	3.1	-1.2	8.7	-2.0	0.6	0.34	1.5	0.5
Sep	7.5	-3.0	15.8	-3.6	1.4	0.19	20.7	0.5
Oct	6.2	-2.3	18.5	-4.1	1.1	0.83	7.5	0.6
Nov	44.2	-20.4	-8.5	2.6	9.7	-11.84	29.7	13.6
Dec	7.1	-3.2	13.4	-3.4	1.5	0.01	3.8	1.1
Jan	52.7	-24.6	6.7	-1.7	11.6	-11.93	9.6	41.7
Feb	7.7	-3.5	8.3	-2.1	1.7	-0.80	5.9	2.1
Mar	18.1	-8.4	10.6	-2.7	4.0	-3.03	6.6	8.3
Annual mean	8.4	-3.7	11.6	-2.8	1.7	-0.55	8.2	2.3
Apr-Oct mean	5.7	-2.4	11.9	-2.8	1.1	0.12	10.2	0.7
Dec-Mar mean	12.1	-5.6	11.2	-2.8	2.6	-1.50	5.4	4.5

Table 3. Comparison of estimated velocities by different box models in Tokyo Bay.

Referances	Horizontal velocity				Vertical velocity	
	Innermost reg.-Central reg.		Central reg.-Mouth of the bay		Innermost reg.	Central reg.
	Upper layer	Lower layer	Upper layer	Lower layer	W_{12}	W_{34}
	cm sec ⁻¹				$\times 10^{-3}$ cm sec ⁻¹	
Matsukawa and Sasaki (1990)	4.0	-2.9	20.1	-11.4	2.1	3.1
Yu (1994)	3.8	-2.5	9.8	-6.1	1.5	1.1
This study	8.4	-3.7	11.6	-2.8	1.7	-0.55

年間平均の水平拡散係数は湾奥-湾央間で 8.2×10^5 cm² s⁻¹, 湾央-湾口間で 5.0×10^6 cm² s⁻¹ であった。Matsukawa and Sasaki (1990) は水平拡散係数を流速と塩分の連続観測より計算し, 5.0×10^5 cm² s⁻¹ という値を, 魚 (1994) は Box model の未知数として水平拡散係数を求め, 湾全域で 5.6×10^6 cm² s⁻¹ という値を得ている。本研究の値は式 (1) から (8) の未知数として求められたものであるが, Matsukawa and Sasaki (1990) の現場観測から求められた数値と近いものとなった。

年間平均の鉛直拡散係数は湾奥では 2.3 cm² s⁻¹, 湾央では 5.0 cm² s⁻¹ であった。Matsukawa and Sasaki

(1990) は湾奥では 0.5 cm² s⁻¹, 湾口で 4.1 cm² s⁻¹, 魚 (1994) は湾全域で 2.5 cm² s⁻¹ と算出している。本研究の値はやや大きめではあるが, 両者に近い値であった。

ここで移流および拡散による水平方向の塩分輸送を比較してみる。年平均の移流による塩分輸送は断面 A_{13} , A_{24} , A_{35} , A_{46} でそれぞれ 2.2×10^5 , 2.2×10^5 , 1.7×10^5 , 1.6×10^5 m³ s⁻¹ であり, 拡散による塩分輸送はそれぞれ 3.3×10^2 , 6.1×10^2 , 3.1×10^3 , 3.9×10^3 m³ s⁻¹ であった。月によっては拡散による塩分輸送が移流による塩分輸送の 15% に達することもあったが (6 月の断面 A_{46}), 平均的には拡散による塩分輸送は移流

Fig. 8. Month-to-month variation of DIN production (upper: in each box, lower: in each layer).

による塩分輸送よりも、湾奥-湾央間で3オーダー、湾央-湾口間で2オーダー低い値となった。

3.3.2. DINの生産, TNの堆積および湾外への窒素の流出の周年変動

Fig. 8に計算により求められた各BoxにおけるDIN生産の変動を示す。上層のBoxではほぼ周年負の値を示し、植物プランクトンにより消費されていることが分かる。またDINの消費は成層期に大きく、混合期に小さくなる傾向にあった。Box 1とBox 3を比べると湾奥のBox 1のほうが、周年にわたり消費が大きかった。下層のBoxではほぼ周年DINが生産されている。季節的には混合期に底層での生産は大きいように見えるが、月による変動が大きく、2月には小さな値を示した。

Box 2およびBox 4におけるTNの堆積の変動をFig. 9に示す。両Boxとも堆積は成層期に大きく、混合期に小さくなった。また、周年にわたり湾央のBox 4よりも湾奥のBox 2で大きかった。Box 2では周年にわたり正の値を示したが、Box 4では4, 9月と混合期には負の値を示した。つまり湾奥では周年堆積していたが、湾央では混合期には窒素が海底より回帰しており、

Fig. 9. Month-to-month variation of TN deposition in the lower layer.

成層期においても海底より回帰していることがあった。

Fig. 10に湾央-湾口間断面 (A_{35} および A_{46}) における窒素の流出の変動を示す。正の値は内湾部から湾外への流出を、負の値は湾外から内湾部への流入を示す。DIN (Fig. 10上) は上層では周年にわたり流出しており、下層では9月を除いて流入している。上層からの流出は、湾内のDIN濃度の変動と対応しており、DIN濃度が低い5~9月に少なく、4月および10~3月に多かった。上層と下層の数値を足して湾央-湾口間のDINの収支を見るとおおむね流出となっているが、5~8月には値が小さくなり、7月には流入となった。

TN (Fig. 10下) は周年上層では流出、下層では流入しているが、断面全体では周年流出する結果となった。4, 9月にやや大きい値が見られるが、それらを除くと季節的な変化は小さかった。

3.3.3. $\text{PO}_4\text{-P}$ の生産, TPの堆積および湾外へのリンの流出の周年変動

Fig. 11に各Boxにおける $\text{PO}_4\text{-P}$ の生産の変動を示す。周年にわたり上層のBoxでは $\text{PO}_4\text{-P}$ は消費、下層のBoxでは生産されている傾向にあった。また、上層の消費、下層の生産ともに成層期に大きく、混合期には小さくなり、はっきりした季節変動を示した。湾奥と湾央を比べると上層のBoxにおける消費は周年湾奥の方が大きく、下層の生産は僅かながら逆転することもあるが湾央で大きかった。

Fig. 10. Month-to-month variations of outflow of DIN (upper) and TN (lower) from central region to the mouth of the bay.

Fig. 11. Same as Fig. 8 but for $\text{PO}_4\text{-P}$.

下層の Box における TP の堆積を Fig. 12 に示す。Box 2 における堆積は成層期に多く、混合期に少なくなる様子が認められる。これに対し、Box 4 では周年にわたり TP が回帰している様子が認められ、特に成層期にその傾向は強くなった。Box 4 で堆積が見られたのは 10 月のみであった。

Fig. 13 に湾中央部から湾外への $\text{PO}_4\text{-P}$ (上) と TP (下) の流出の変動を示す。上層の $\text{PO}_4\text{-P}$ の流出は、湾内上

Fig. 12. Same as Fig. 9 but for TP.

Fig. 13. Same as Fig. 10 but for $\text{PO}_4\text{-P}$ (upper) and TP (lower)

層の濃度に対応して夏季に少なく、秋季に多くなった。成層期の流出量は少ないため下層からの流入量のほうが多くなり、5, 7, 8 月には断面全体としては $\text{PO}_4\text{-P}$ は流入していた。TP は表層で流出、下層で流入していることは $\text{PO}_4\text{-P}$ と同じであるが、成層期にも比較的多く流出しており、成層期上層からの P 流出は主に有機態 P の流出によることが分かる。断面全体でみると、TP は周年流出しており、その値は春季～秋季に多く冬季はやや少なめであった。また、9 月に他の月よりも約 3 倍多い流出が見られた。

3.3.4. 内湾部における窒素の循環と収支

Fig. 14, 15 はそれぞれ内湾部における DIN, TN の循環、収支を成層期、混合期および周年平均で表した

ものである。

内湾部全体への DIN の負荷は成層期平均 319 t d^{-1} 、混合期平均 198 t d^{-1} 、周年の平均では 269 t d^{-1} であった。上層における DIN の生産はそれぞれ -368 、 -254 、 -321 t d^{-1} となり、下層ではそれぞれ 96 、 179 、 130 t d^{-1} となった。湾中央-湾口間の Box の断面を通じた DIN の流出はそれぞれ 58 、 95 、 73 t d^{-1} となった。

Matsukawa and Sasaki (1990) は内湾部上層における DIN の消費を夏季 230 t d^{-1} 、冬季 60 t d^{-1} 、魚 (1994) は夏季 250 t d^{-1} 、冬季 50 t d^{-1} と計算している。これらの値に比べ、本研究の結果は大きく、特に冬季に差が大きくなった。

山口 (1993) は多摩川河口沖 (本研究の Sta. F3 にほぼ同じ) で測定された基礎生産量をまとめ、 $0.90 \sim 16.42 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ という数値を示している。本研究の各月の内湾部の全 POC, PON データについて散布図を描き、回帰直線の傾き (重量で $3.8 \sim 6.2$ の間で変動) を求め、上層の DIN の消費速度に乗じて求めた DIC の消費速度は、成層期 $1,865 \text{ t d}^{-1}$ 、混合期 $1,137 \text{ t d}^{-1}$ 、周年 $1,564 \text{ t d}^{-1}$ (内湾部の海域面積を 927 km^2 とすると、それぞれ 2.01 、 1.23 、 $1.69 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) となる。山口 (1993) の値は湾奥の 1 測点のものであるのに対し、本研究の値は湾全域を対象としたものであり、また見積もった方法も異なるので単純に比較できないが、山口 (1993) の示した数値の範囲に含まれるものであった。

TN の循環について見ると、負荷は成層期、混合期、周年でそれぞれ 365 、 225 、 307 t d^{-1} となり、海底への堆積はそれぞれ 239 、 71 、 169 t d^{-1} であり、湾外への流出はそれぞれ 137 、 124 、 132 t d^{-1} となった。

DIN の流出は混合期に多いが、TN についてみると流出は成層期にやや多いものの周年それほど変わらない。そのため、窒素は成層期は懸濁態 (PON) または溶解有機態 (DON) として、混合期は DIN として多く流出していることが分かる。流出する TN 中に占める DIN の割合は、成層期 42% 、混合期 77% 、周年平均で 55% であった。成層期に DIN として流出する割合が低いのは、植物プランクトンの生産が多くなるためと考えられる。

Matsukawa and Sasaki (1990) は窒素の堆積速度を夏季 140 t d^{-1} 、冬季 -140 t d^{-1} と算出しており、ま

Fig. 14. DIN budget in Tokyo Bay (upper: stratified season, central: vertically mixed season, lower: through the year). Arrows denote direction of flux. Numerals without square or parenthesis denote load from land or transport across the interface or the cross-sections. The left numerals denote transport by advection and the right ones denote transport by diffusion. Numerals within square denote production. Numerals within parenthesis denote temporally changing rate of ton per day.

Fig. 15. TN budget in Tokyo Bay (upper: stratified season, central: vertically mixed season, lower: through the year). Arrows denote direction of flux. Numerals without square or parenthesis denote load from land or transport across the interface or the cross-sections. The left numerals denote transport by advection and the right ones denote transport by diffusion. Numerals within square with arrow denote sinking or sedimentation. Numerals within parenthesis denote temporally changing rate of ton per day.

た魚 (1994) は窒素は夏季に堆積し、冬季に巻き上げられる傾向にあり、年平均で 81 t d^{-1} 堆積していると述べている。成層期に多く堆積し、混合期には巻き上げが多く堆積が少なくなる傾向は、本研究と一致している。ただし、Matsukawa and Sasaki (1990) は流速や鉛直拡散計数を求めた際の上下層の境界面深度 (全域で 10 m) や水平拡散計数 ($5.0 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$) をそのまま用いると窒素の堆積速度が Matsumoto (1985) の値より 1 オーダー大きくなることから、境界面を北西岸で 20 m、南東岸で 0 m に傾け、湾央-湾口間の水平拡散計数を 1 オーダー大きくし ($5.0 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)、さらに湾央での堆積が不自然に負となることから湾央における鉛直拡散計数を計算値の 1/2 の値を用いて上記の結果を得ている。彼らは水平拡散計数を大きくし、境界面を傾けて Matsumoto (1985) の値に近くなる理由として、塩分に比べ DIN 濃度は鉛直方向よりも水平方向に大きく変化すること、地球の自転のため境界面が傾いていること、湾口の強い潮流の存在を挙げている。しかし、宇野木・岸野 (1977) の DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ の水平分布図では湾の東岸と西岸でさほど濃度差が大きくなり、日向ら (2001) の湾横断方向の水温、塩分、 σ_t の鉛直断面図を見ると境界面は東岸よりも西岸でやや深くなっているがそれほど大きくは傾いていないことから、本研究では水、塩分収支を計算したときの諸元のまま窒素、リン収支を計算した。

Matsumoto (1985) は ^{210}Pb 法により見積もった全堆積物の堆積速度と表層堆積物の窒素濃度から、東京湾における窒素の堆積速度を $4,200 \text{ t year}^{-1}$ つまり 11.5 t d^{-1} としている。本研究のボックスモデルでいう「堆積」とは実際に海底に堆積するもの以外に、漁獲などにより陸揚げされる分、脱窒素により大気中へ散逸する分などの窒素が含まれる。漁獲や釣りによって東京湾から陸上に取り上げられる窒素は向井 (1993) の見積もりでは 400 t year^{-1} (1.1 t d^{-1}) であり、それほど大きな量ではない。小池 (1993) は様々な海域における底層水中の硝酸 + 亜硝酸の濃度と堆積物表層における脱窒素速度との相関関係から、東京湾の堆積物表層における脱窒素速度を 10 t d^{-1} と見積もっている。一方、Seitzinger (1988) は様々な内湾や河口における脱窒素の調査結果をまとめ、流入する窒素の約 40% が脱

窒素されると述べている。この値を本研究に適用すると、年平均の TN の流入負荷は 307 t d^{-1} (Fig. 15) なので、脱窒素速度は 123 t d^{-1} となり、小池 (1993) の見積もりとは大きな差が生じることとなるが、本研究で計算された周年平均の窒素の堆積速度 (169 t d^{-1}) と Matsumoto (1985) が見積った堆積速度との差の大部分を説明することができる。しかし、小池 (1993) の見積もりも Seitzinger (1988) からの見積りも間接的な方法によるものであり、東京湾の脱窒素速度に関してはより詳細な調査を行う必要があるといえる。

また、黒潮が東京湾口に接近することによって生じる高濁度底層水の間欠的な流出や (Yanagi *et al.*, 1989, 1991; 日向ら, 2001), 台風や地震による表層堆積物の再懸濁と湾外への輸送 (乗木ら, 2000) などのイベントにより窒素の一部が湾外へ流出している可能性も考えられる。

3.3.5. 内湾部における P の循環と収支

Fig. 16, 17 に内湾部における $\text{PO}_4\text{-P}$, TP の循環をそれぞれ成層期, 混合期および周年の平均として示す。

$\text{PO}_4\text{-P}$ の負荷は成層期 15.5, 混合期 10.4, 周年 13.4 t d^{-1} であり、上層の生産はそれぞれ -36.5 , -15.2 , -27.7 t d^{-1} , 下層の生産はそれぞれ 25.3, 11.3, 19.5 t d^{-1} , 湾外への流出はそれぞれ 3.1, 5.3, 4.0 t d^{-1} となった。TP の負荷は成層期 20.8, 混合期 12.8, 周年 17.5 t d^{-1} , 海底への堆積はそれぞれ 1.7, 3.0, 2.2 t d^{-1} , 湾外への流出はそれぞれ 17.6, 9.2, 14.1 t d^{-1} となった。流出する TP 中に占める $\text{PO}_4\text{-P}$ の割合は、成層期 18%, 混合期 58%, 周年平均で 28% であり、窒素と同様に、P も成層期に $\text{PO}_4\text{-P}$ として流出する割合が低かった。

東京湾の P 循環について、各月の観測データをもとに議論されたものは本研究が初めてである。Matsumoto (1985) が前出の窒素と同様の方法で見積もったリンの堆積速度は $1,000 \text{ t year}^{-1}$ (2.7 t d^{-1}) であり、本研究の結果はそれよりやや少ない結果となった。Matsumoto (1985) が研究を行ったのは 1980, 81 年であり、堆積物の試料はその前数年間に堆積したものと考えられる。1970 年代前半は東京湾の有機汚濁がピークであったこ

Fig. 16. Same as Fig. 14 but for $\text{PO}_4\text{-P}$.

と (高田, 1993), 負荷は経年的に減少しつつけていること (安藤ら, 1999) を考慮すると, Matsumoto (1985) が調査を行った時よりリンの堆積速度は減少している可能性が考えられ, 本研究の数字は妥当なものと考えてよさそうである。

Fig. 17. Same as Fig. 15 but for TP.

3.3.6. 窒素・リンの循環および収支の比較

湾奥と湾中央の堆積量を比較すると TN, TP とも湾奥の方が大きい。このことは Matsumoto (1985) の結果で堆積速度、表層堆積物中の TN, TP 濃度の極大がともに湾奥の東京港沖を中心に広がっていることと一致する。湾奥では TN, TP とも周年堆積している。これに対し、湾中央では TN は成層期に堆積し、混合期に回帰しているが、TP は周年回帰している。TN が堆積して

いる成層期に TP が回帰しているのは $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出によるためと考えられる。これは下層における $\text{PO}_4\text{-P}$ の生産が成層期に大きいことと一致する。

成層期にリンが溶出することは、TN, TP の湾外への流出量の変動にも影響を与えている。周年平均の流出量に対する各期の流出量の変動は TN では成層期 104%, 混合期 94%とあまり変わらないが、TP ではそれぞれ 125, 65%であり成層期に高い割合を示す。これは成層期の TP の流出には溶出した分のリンが加わるためと考えられる。

下層における DIN および $\text{PO}_4\text{-P}$ の生産は、陸上からの流入負荷に対して、DIN では成層期 30%, 混合期 90%, 周年 48%, $\text{PO}_4\text{-P}$ ではそれぞれ 164, 109, 146%であり、特に成層期に両者の生産の割合に大きな差がある。下層の生産は水柱での有機物からの再生と底質からの溶出を含んだものであるが、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の数値が大きいことは底質からの溶出が非常に大きいことを示している。下層の $\text{PO}_4\text{-P}$ 生産は、周年にわたり陸上からの $\text{PO}_4\text{-P}$ 負荷より大きく (それぞれ周年平均で 19.5, 13.4 t d⁻¹), 年間を平均して約 1.5 倍となっている。

従来、東京湾では Redfield 比 (元素比で $N/P = 16$) に比べて、流入負荷の N/P 比が高く、海水中の $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比も高いことから、植物プランクトンの増殖を抑制し、環境回復を図るためにはリン負荷の削減が効果的であると言われてきた。

植物プランクトンは水柱の $\text{PO}_4\text{-P}$ を細胞内に過剰に取り込み蓄積することが知られている (Miyata *et al.*, 1986)。Miyata and Hattori (1986) は $\text{PO}_4\text{-P}$ が低濃度 ($0.1 \mu\text{M}$ 以下) の東京湾の海水に $\text{PO}_4\text{-P}$ を添加した場合としない場合とで植物プランクトンの培養を行い、両者で DIN の取り込み速度は変わらないことを示している。これは植物プランクトンが細胞内に蓄えたリンを利用し増殖したためと考えられ、彼らは水柱のリン $\text{O}_4\text{-P}$ が少なくても必ずしも植物プランクトンの成長がリンによって制限されているとはいえないと述べている。

Fig. 18 に上層のボックス (Box 1, Box 3) における溶存無機態、懸濁態および両者の和の N/P の元素比 (それぞれ $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$, PON/PP , $(\text{DIN} + \text{PON})/(\text{PO}_4\text{-P} + \text{PP})$) の季節変動を示す。 $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比は春季および冬季に 40 以上の高い値を示し、夏季を中心に低下す

Fig. 18. Month-to-month variations of DIN/PO₄-P (upper), PON/PP (central) and (DIN + PON)/(PO₄-P + PP) (lower) ratio in Box 1 and Box 3 in Tokyo Bay from April 1998 to February 1999.

るが、16以下の値を示すことは少ない。一方、PON/PP比はほぼ周年16以下の値を示している。これは植物プランクトンがリンを細胞内に蓄積しているためと考えられる。さらに (DIN + PON)/(PO₄-P + PP) 比をみると、夏季以外は16以上の値を示しており、従来言われているようにリンの方が植物プランクトンの増殖を律速する可能性あるが、夏季にはほぼ16以下となっており窒素の方が律速する可能性あるといえる。

以上のような N/P 比の変動は夏季に窒素の堆積(脱窒素?) が大きいこと (Fig. 9, 15) とともに、リンの溶出が大きいことに起因していると考えられる。リンの溶出の影響が大きいことを考えると、東京湾の環境回復のためにはリンのみならず窒素についても負荷を削

減する必要があるといえる。また削減幅は、リンの溶出が抑制されるよう、貧酸素水塊が形成されないレベルが望ましい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、東京水産大学 山口 征矢教授、田中 祐志助教授、東京水産大学浮遊生物学、生物海洋学研究室の学生各位、電力中央研究所 今村 正裕氏には観測、試料の採取、分析に関してご協力頂き、また有益な議論をして頂いた。特に、許 耀霖氏(元浮遊生物学研究室)には各態窒素試料の一部を分析して頂いた。東京水産大学 村井 寧氏、電力中央研究所 松梨 史郎博士には本研究をまとめるにあたり貴重なコメントを頂いた。東京水産大学研究練習船「青鷹丸」の歴代船長および乗組員の方々には観測および試料の採取に関して多大なるご協力を頂いた。以上の方々に篤くお礼申し上げる。

References

- 安藤 晴夫, 柏木 宣久, 宮 勝幸, 小倉 久子 (1999): 東京都内湾の水質の長期変動傾向について. 1999 年東京都環境科学研究所年報, 60-67.
- 青木 延浩 (1999): 貧酸素水塊形成機構とその挙動. 月刊海洋, **31**, 477-485.
- 風呂田 利夫 (1997): 東京湾の生態系と環境の現状, p.2-23. 東京湾の生物誌, 沼田 真・風呂田 利夫編, 築地書館, 東京.
- Guo, Xinyu and T. Yanagi (1995): Wind driven current in Tokyo Bay, Japan during winter. *La mer*, **33**, 89-101.
- 日向 博文, 灘岡 和夫, 八木 宏, 田淵 広嗣, 吉岡 健 (2001): 黒潮流路変動に伴う高温沿岸水波及時における成層期東京湾内の流動構造と熱・物質輸送特性. 土木学会論文集, **684**, 93-111.
- Ishimaru, T. (1991): Primary production in Tokyo Bay and material flux to the open ocean (Abstract). *La mer*, **29**, 180.
- 貝塚 爽平 (1993): 東京湾の生い立ち, p.1-19. 東京湾の地形・地質と水, 貝塚 爽平編, 築地書館, 東京.
- 鎌谷 明善 (1993): 過去と現在, p.11-27. 東京湾 -100 年の環境変遷-, 小倉 紀雄編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 神奈川県水産総合研究所・千葉県水産試験場富津分場 (1999): 東京湾口海況図 (1999 年 1 月 12 日号-1999 年 1 月 15 日号).
- 小池 勲夫 (1993): 微生物, p.102-117. 東京湾 -100.年の環境変遷-, 小倉 紀雄編, 恒星社厚生閣, 東京.

- 蔵本 武明, 中田 喜三郎 (1991): 東京湾における流動と底層 DO 濃度シミュレーション. 沿岸海洋研究ノート, **28**, 140-151.
- Matsukawa, Y. and K. Sasaki (1990): Nitrogen budget in Tokyo Bay with special reference to the low sedimentation to supply ratio. *J. Oceanogr.*, **46**, 44-54.
- Matsumoto, E. (1985): Budget and residence time of nutrients in Tokyo Bay, p. 127-136. In *Marine and Estuarine Geochemistry*, edited by A. C. Sigleo and A. Hattori, Lewis Publishers, Michigan.
- 松村 剛, 堀本 奈穂, 許 耀霖, 石丸 隆 (2001): 東京湾における栄養塩の動向 (1989-1998 年). *La mer*, **39**, 19-32.
- Menzel, D. W. and N. Corwin (1965): The measurement of total phosphorus in seawater based on the liberation of organically bound fractions by persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.*, **10**, 280-282.
- Miyata, K. and A. Hattori (1986): Distribution and seasonal variation of phosphorus in Tokyo Bay. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 241-254.
- Miyata, K., A. Hattori, and A. Otsuki (1986): Variation of cellular phosphorus composition of *Skeletonema costatum* and *Heterosigma akashiwo* grown in chemostat. *Mar. Biol.*, **93**, 291-297.
- 向井 宏 (1993): 動物プランクトン・魚類, p. 118-122. 東京湾 -100 年の環境変遷-, 小倉 紀雄編, 恒星社厚生閣, 東京.
- Murphy, J. and J. P. Riely (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, **27**, 31-36.
- 野村 英明 (1998): 1900 年代における東京湾の赤潮と植物プランクトン群集の変遷. 海の研究, **7**, 159-178.
- 乗木 新一郎, 海老原 真弓, 工藤 純子 (2000): 東京湾口部における沈降粒子束の季節変動. 海の研究, **9**, 205-217.
- Seitzinger S. P. (1988): Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: Ecological and geochemical significance. *Limnol. and Oceanogr.*, **33**, 702-724.
- Solòrzano, L. and J. H. Sharp (1980): Determination of total dissolved nitrogen in natural waters. *Limnol. Oceanogr.*, **25**, 751-754.
- 高田 秀重 (1993): 水質, p. 39-44. 東京湾 -100 年の環境変遷-, 小倉紀雄編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 谷本 照巳, 星加 章, 三島 康史, 柳 哲雄 (2001): 大阪湾における懸濁物質・窒素・リンの収支と循環. 海の研究, **10**, 397-412.
- Technicon method (1978): No.154-71 W/B.
- 東京都環境科学研究所 (2000): 東京都環境科学研究所ニュース No. 28. 10pp.
- 土屋 隆夫, 森 真朗 (1995): 東京湾の環境 (その 1) -東京湾の地形と流入河川および潮流-. 用水と廃水, **37**, 383-390.
- 宇野木 早苗, 岸野 元彰 (1977): 東京湾の平均的海況と海水交流. Technical Report of the Physical Oceanography Laboratory, *The Institute of Physical and Chemical Research*, No. 1, 89 pp.
- 宇野木 早苗, 岡崎 守良, 長島 秀樹 (1980): 東京湾の循環流と海況. Technical Report of the Physical Oceanography Laboratory, *The Institute of Physical and Chemical Research*, No. 4, 262 pp.
- 宇野木 早苗 (1998): 内湾の鉛直循環流と河川流量の関係. 海の研究, **7**, 283-292.
- 山口 征矢, 有賀 祐勝 (1988): 東京湾における基礎生産の変遷. 沿岸海洋研究ノート, **25**, 87-95.
- 山口 征矢 (1993): 藻類, p.61-77. 東京湾 -100 年の環境変遷-, 小倉紀雄編, 恒星社厚生閣, 東京.
- Yanagi, T., H. Tamaru, T. Ishimaru, and T. Saino (1989): Intermittent outflow of high-turbidity bottom water from Tokyo Bay in summer. *La mer*, **27**, 34-40.
- Yanagi, T., S. Okada, T. Ishimaru, and T. Saino (1991): Behavior of high turbidity water outflow from Tokyo Bay in summer. *La mer*, **29**, 45-51.
- 魚 京善 (1994): 東京湾の海洋環境と生態系モデル. 東京水産大学平成六年度博士論文, 56 pp.
- Yu. J.-S., T. Ishimaru, M. Murano, and A. Otsuki (1994): Some improvements in the salicylate-dichloroisocyanurate method for the determining ammonia in seawater. *La mer*, **32**, 119-122.

Nitrogen and Phosphorus Budgets in Tokyo Bay

Tsuyoshi Matsumura *, Takashi Ishimaru[†], and Tetsuo Yanagi [‡]

Abstract

Seasonal variations in nitrogen and phosphorus budgets in Tokyo Bay were estimated by use of a box model. The consumptions of DIN and PO₄-P in the upper layer were large in the stratified season and small in the vertically mixed season. The production of DIN in the lower layer was small in the stratified season and a little large in the vertically mixed season. But the production of PO₄-P in the lower layer was large in the stratified season and small in the vertically mixed season. The sedimentations of TN and TP to the bottom showed a tendency to be large in the stratified season and small in the vertically mixed season. But the sedimentation of TP was not as large as shown in the sedimentation of TN. The productions of DIN and PO₄-P through the year in the lower layer compared to terrestrial loads were 48 and 146%, respectively. These differences between N and P behaviors were caused by desorption of P from the sediment in the stratified season.

Key words: Tokyo Bay, box model, N and P budgets

(Corresponding author's e-mail address: matsumu@do8.enjoy.ne.jp)

(October 2, 2001 received; August 22, 2002 accepted)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2002)

*Department of Ocean Science, Tokyo University of Fisheries, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan.

Present address : Aichi Prefectural Sea Farming Center

1-3 Aza-Ichizenmatsu, Oaza-nakayama, Atsumi-cho, Aichi 441-3615, Japan

[†]Department of Ocean Science, Tokyo University of Fisheries

[‡]Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-Park, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan