

## 東京湾, 伊勢湾, 大阪湾の淡水・塩分・DIP・DIN 収支\*

柳 哲 雄\*\*

## Water, Salt, DIP and DIN Budgets in Tokyo, Ise and Osaka Bays

Tetsuo Yanagi

東京湾, 伊勢湾, 大阪湾の淡水, 塩分, DIP, DIN に対する物質収支モデルのレビューを行って, それぞれの閉鎖的内湾の物質輸送特性を明らかにする。

Budgets of fresh water, salt, DIP and DIN in Tokyo, Ise and Osaka Bays are reviewed in order to clarify the characteristics of material cycling of these bays.

キーワード: 物質収支, 保存物質, 非保存物質, ボックスモデル

## 1. はじめに

東京湾, 伊勢湾, 大阪湾は我が国の代表的な富栄養化した閉鎖的内湾である。蔵本・中田 (1992)<sup>1)</sup>は数値生態モデルを用いて, これら三つの内湾の底層 DO 濃度を 3 ml/l 以上に保つための窒素・リンの最大負荷量を明らかにしている。しかし, これら三つの富栄養化した閉鎖的内湾の物質輸送特性がどのように似ていて, どのように異なっているかは十分には明らかにされてはいない。これら三つの内湾の物質収支を比較しつつ研究することで, それぞれの内湾に特有の物質輸送過程, また共通した物質輸送過程が明らかになることが期待される。

本稿では簡単なボックスモデルの手法 (柳, 1997<sup>2)</sup>) を用いて, 東京湾, 伊勢湾, 大阪湾の淡水・塩分・DIP (Dissolved Inorganic Phosphorus, 溶存態無機リン)・DIN (Dissolved Inorganic Nitrogen, 溶存態無機窒素) 収支を明らかにすることを試みる。

## 2. 淡水・塩分収支

Fig. 1 に宇野木・岸野 (1977)<sup>3)</sup>, 宇野木ら (1974)<sup>4)</sup>, 柳ら (1985)<sup>5)</sup>のデータを元に計算した東京湾, 伊勢湾, 大阪湾の淡水・塩分収支モデルの結果をまとめて示す。ここで東京湾は観音崎と富津埼を結ぶ線より内側のいわゆる東京内湾を, 伊勢湾は三河湾を含んだ湾を表す。またこれら三つの湾でデータの得られた年次は異なるが, それぞれ年平均値を扱っている。

まず淡水収支を見ると, 伊勢湾の河川からの淡水供給量が 3.0 km<sup>3</sup>/month と最も大きく, 東京湾, 大阪湾のそれらは 0.67, 0.77 km<sup>3</sup>/month とほぼ同様である。東京湾, 伊勢湾では降水量 (それぞれ 0.12, 0.25 km<sup>3</sup>/month) が蒸発量 (それぞれ 0.11, 0.15 km<sup>3</sup>/month) より大きい。これに対して, 大阪湾では蒸発量 (0.20 km<sup>3</sup>/month) の方が降水量 (0.16 km<sup>3</sup>/month) より大きい。河川流量に正味の海面降水量 (大阪湾の場合は負) を加えたものが湾口から外洋に流出する淡水流出量 ( $R_f$ ) となるが, 伊勢湾の 3.1 km<sup>3</sup>/month が最も大きい。

湾内の淡水存在量 ( $V_f$ ) は次式で求めることが出来る。

$$V_f = \frac{S_o - S_i}{S_o} V \quad (1)$$

ここで  $S_o$  は湾外水の平均塩分,  $S_i$  は湾内水の平均塩分,  $V$  は湾の体積である。塩分収支の図に示した  $S_o$  と  $S_i$  の値を使って, 求めた各湾の  $V_f$  が淡水収支の図中に示してある。伊勢湾内には東京湾の約 4 倍, 大阪湾の約 2 倍の淡水が存在している。

淡水の平均滞留時間 ( $\tau_f$ ) は淡水存在量 ( $V_f$ ) を淡水流出量 ( $R_f$ ) で割って求めることが出来るが, それも淡水収支の図中に示してある。 $\tau_f$  は伊勢湾が 0.9 month と最も短い。このことが淡水供給量は伊勢湾が東京湾の約 5 倍, 大阪湾の約 4 倍あるのに,  $V_f$  はそれぞれ約 4 倍と約 2 倍しかないことと結びついている。すなわち伊勢湾では大きな淡水供給によって湾内に強い鉛直循環流が発達し, 主に湾奥の河川から流入した淡水が上層を湾外に向かって流れ, すみやかに湾外へ輸送されている。

塩分収支の結果の中で, 湾口を通じての海水交換量

\* 1997年1月6日受領, 1997年3月6日受理

\*\* 愛媛大学工学部環境建設工学科

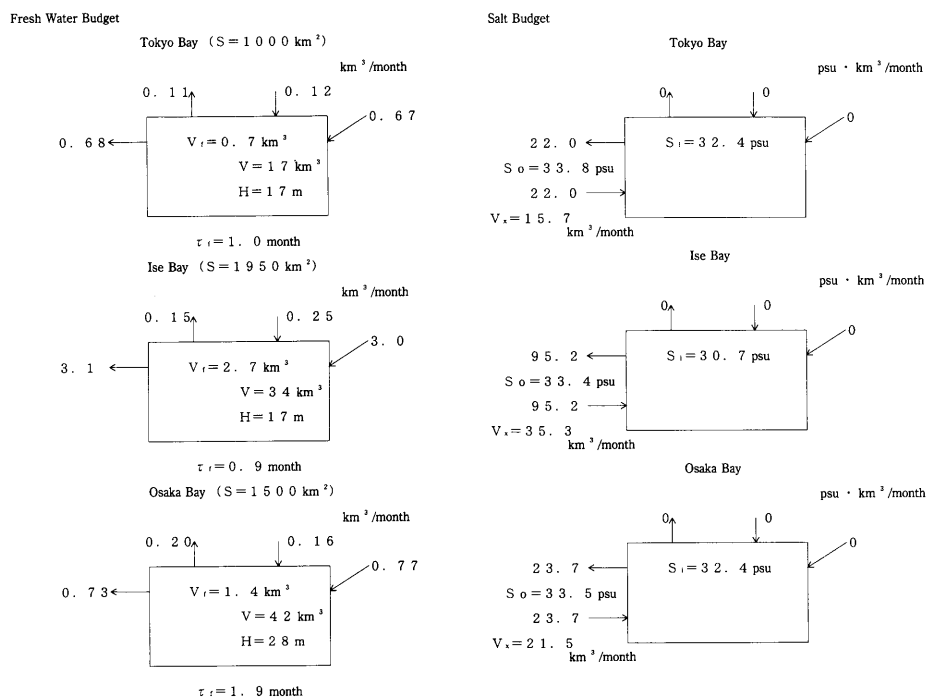


Fig. 1 Fresh water and salt budgets.

( $V_x$ ) は淡水流出に伴い湾外へ流出する塩分フラックス ( $R_i S_i$ ) が湾内外の塩分差 ( $S_o - S_i$ ) に海水交換量をかけて得られる海水交換による塩分フラックスに等しいとして求められる。

$$V_x = \frac{R_i S_i}{S_o - S_i} \quad (2)$$

伊勢湾内の平均塩分が30.7 psu と最も低いが、湾口を通じての外洋との海水交換量 ( $V_x$ ) は伊勢湾、東京湾の順に大きい。伊勢湾口では、先述した鉛直循環流の発達により、上層で湾外に、下層で湾奥に向かう鉛直シアー流が発達して、大きな海水交換量を生んでいると考えられる。淡水供給量がほぼ等しい東京湾と大阪湾

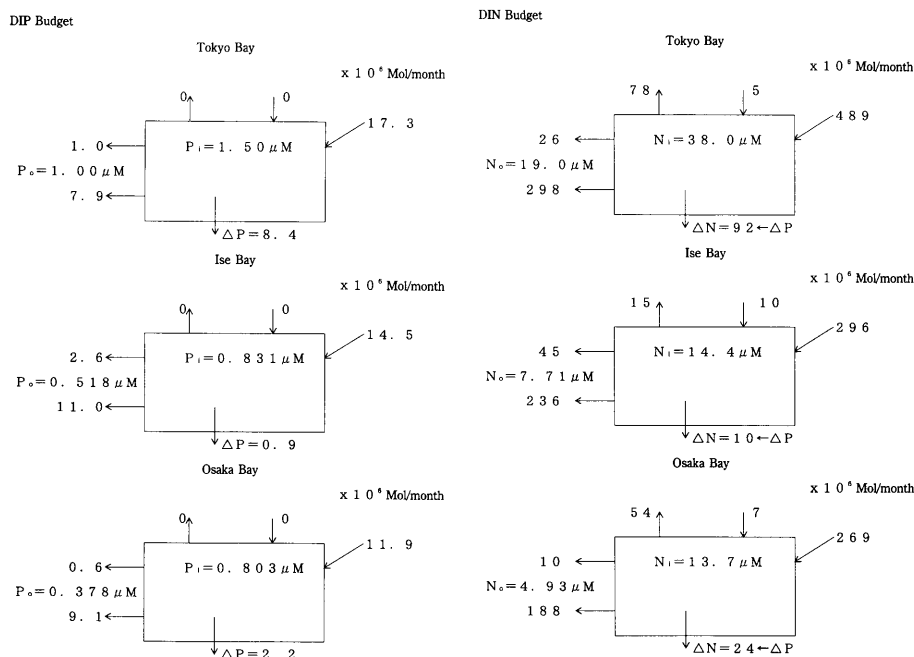


Fig. 2 DIP and DIN budgets.

で、湾口の海水交換量が大阪湾の方が大きい理由は、大阪湾の湾口最大潮流が160 cm/sec であるのに対して、東京湾のそれが90 cm/sec と小さいためであると考えられる (柳, 1996<sup>6)</sup>).

### 3. DIP・DIN 収支

Fig. 2 に Matsumoto (1985)<sup>7)</sup>, 小倉 (1985)<sup>8)</sup>, 西条 (1985)<sup>9)</sup>, 城 (1985)<sup>10)</sup>, 柳ら (1985)<sup>5)</sup>, 門谷・岡市 (1988)<sup>11)</sup> のデータをまとめて計算した DIP, DIN 収支を示す. この場合も淡水・塩分と同様各湾でデータが得られた年次は異なるが, それぞれ湾全域における四季の観測データをもとに, 年平均値を扱っている.

図中左端の外向きフラックスは上段が淡水流出による移流フラックス (東京湾の DIP の場合,  $R_t P_i = 1.0 \times 10^6$  Mol/month), 下段は海水交換による分散フラックス (東京湾の DIP の場合,  $V_x(P_i - P_o) = 7.9 \times 10^6$  Mol/month) を表す.

湾内の DIP 濃度が最も高いのは東京湾の  $1.5 \mu\text{M}$  で, 伊勢湾と大阪湾は  $0.8 \mu\text{M}$  とほぼ同じレベルである. 東京湾の湾内 DIP 濃度が高い理由は小さな体積 ( $V = 17 \text{ km}^3$ ) に多量の DIP が負荷されている ( $17.3 \times 10^6$  Mol/month) ためである. 流入する DIP から淡水流出や海水交換により湾外へ流出する DIP を差し引いて得られる  $\Delta P$  は, 湾内で  $\Delta P$  の分だけ DIP が OP {Organic Phosphorus, 有機態リン = POP (Particulate Organic Phosphorus, 懸濁態有機リン) + DOP (Dissolved Organic Phosphorus, 溶存態有機リン)} に変換され, 海底に堆積するか, 湾外に流出していることを示している.  $\Delta P$  は東京湾, 大阪湾, 伊勢湾の順に大きい. このことは光合成から呼吸による分解を差し引いたネットの有機化がこの順に大きいことを示している.

リンと窒素の無機態から有機態への変換が主に植物プランクトンの光合成によって行われているとしたら,  $\Delta P$  に懸濁粒子の N/P 比をかけた分だけ, DIN も ON {Organic Nitrogen, 有機態窒素 = PON (Particulate Organic Nitrogen, 懸濁態有機窒素) + DON (Dissolved Organic Nitrogen, 溶存態有機窒素)} に変換され,  $\Delta N$  が生じているはずである. 伊勢湾に関しては存在しないが, 懸濁粒子の N/P 比の実測値は東京湾上層で10.8, 下層で11.3 (佐々木, 1991<sup>12)</sup>), 大阪湾で11.6 (門谷ら, 1991<sup>13)</sup>) という値が得られている. そこで, ここではこれらの値の平均値11を各湾の  $\Delta P$  に乗じて  $\Delta N$  を求めた.

DIN の収支図においては河川水と降水 (ドライフォールも含む) により湾内に流入する DIN から淡水流出, 海水交換,  $\Delta N$  により湾内から消失する DIN を差し引いて, その差は脱窒により大気中に流出するとして大気

への流出フラックスを求めた. DIN 収支図中の  $78, 15, 54 \times 10^6$  Mol/month という値がそれである. この結果を見ると単位面積当たりの脱窒フラックスは東京湾, 大阪湾, 伊勢湾の順に, 2.3, 1.1, 0.23 mol/day/m<sup>2</sup> となり, 東京湾で最も大きくなっている.

### 4. 考 察

各湾口の断面積に平均潮流流速をかけて得られる湾口の海水交流流量 ( $V_{tx}$ ) は Table 1 のようである. Fig. 1 に示した湾口での海水交換流量 ( $V_x$ ) も Table 1 に示してある. 各湾口での交換率  $R_t = V_x/V_{tx}$  を定義して, それも同じ Table 1 に示した. ここで大阪湾は友が島水道のみで湾内水は交換しているとし, 明石海峡の存在は無視してある. これを見ると, 伊勢湾の交換率  $R_t$  が24.3% と最も大きい. これは先述したように, 湾口で鉛直循環流が発達しているために, 湾外水と湾内水の交換が効率よく起こっているためである. 東京湾の  $R_t$  は19.5% で大阪湾の  $R_t$  の10.1% より大きい, これは湾口部が東京湾の方が大阪湾よりくびれていて, 潮流による海水交換がより効率よく起こっていることと, 冬季の季節風が東京湾の方が強いために, 上層を湾外, 下層を湾奥に向かう鉛直循環流が東京湾の方がよく発達するためであると思われる.

Table 1 Bay mouth area, maximum tidal current speed, water transport volume, water exchange volume and their ratio.

	Area (km <sup>2</sup> )	Tidal Current (cm/s)	$V_{tx}$ (km <sup>3</sup> /m.)	$V_x$ (km <sup>3</sup> /m.)	$V_x/V_{tx}$ (%)
Tokyo Bay	0.21	90	80.4	15.7	19.5
Ise Bay	0.40	85	145	35.3	24.3
Osaka Bay	0.31	160	212	21.5	10.1

各湾の淡水, DIP, DIN の平均滞留時間をまとめると Table 2 のようになる. ここで平均滞留時間を求めるさいに, 各湾ともバックグラウンドの DIP, DIN 濃度 (陸からの負荷がなくても湾内に存在する DIP, DIN) を太平洋表層200 m 以浅の平均濃度と考え, それぞれ, 0.19

Table 2 Average residence times of fresh water, DIP, DIN and their ratios. (in month)

	$\tau_f$	$\tau_p$	$\tau_p/\tau_f$	$\tau_N$	$\tau_N/\tau_f$
Tokyo Bay	1.0	1.3	1.3	1.2	1.2
Ise Bay	0.9	1.5	1.7	1.4	1.6
Osaka Bay	1.9	2.2	1.2	1.9	1.0

$\mu\text{M}$ ,  $2.04\mu\text{M}$  (中西, 1985<sup>14)</sup>) として, その濃度を現在の湾内濃度から差し引いて, 湾内存在量を計算してある。

Table 2 によると, 東京湾と大阪湾では淡水の平均滞留時間と DIP, DIN の平均滞留時間がほぼ等しい (1.0~1.3倍) のに対して, 伊勢湾では DIP, DIN の平均滞留時間が淡水のそれより, 1.6~1.7倍長い。これは伊勢湾では鉛直循環流がよく発達して, 上層で湾口に運ばれながら有機化され, 下層に沈降して, 湾奥に運ばれながら, 無機化して再び上層に湧昇して有機化されるという栄養物質の輸送機構が東京湾, 大阪湾より効果的に働いているためであると考えられる。

各湾の DIP, DIN の負荷量の N/P 比と湾内存在量の N/P 比をまとめたものを Table 3 に示す。東京湾では負荷量の N/P 比と湾内存在量の N/P 比があまり変わらないのに対して, 伊勢湾と大阪湾では負荷量の N/P 比は 20.4~22.6 と大きい のに対して, 湾内存在量の N/P 比は 17.1~17.3 とレッドフィールド比の 16 に近い値になっている。これは伊勢湾, 大阪湾では湾内に負荷された DIN, DIP のうち, 何らかの原因で DIN がより多く湾内で消失するためであると考えられる。

さらに三つの湾とも湾内の DIP, DIN の N/P 比は 16 以上であるので, 窒素とリンに関して年間平均で考えた光合成の制限栄養塩はリンであると考えられる。このことは各湾の DIN の平均滞留時間が DIP の平均滞留時間より短いこととも対応している (Table 2)。

Fig. 2 によれば, 東京湾の脱窒フラックスは  $78 \times 10^6 \text{ Mol/month} = 1.1 \text{ ton/month/km}^2$  となるが, これは東京湾で別の方法により推定されている脱窒フラックス  $0.20 \text{ ton/month/km}^2$  (小池, 1993<sup>15)</sup>) の約 5.5 倍になっている。小池の方法は底層海水中的  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$  濃度と脱窒速度の関係を両対数グラフの相関関係から見積もるもので, 必ずしも十分な精度があるわけではない。いずれにしても各湾の正確な脱窒量の見積りは今後の重要な研究課題であろう。

Table 4 には小倉 (1985)<sup>8)</sup>, 西條 (1985)<sup>9)</sup>, 橋本ら (1997)<sup>16)</sup> のデータをもとに得た各湾の平均的な基礎生産量 (P. P.) と, Fig. 2 の  $\Delta\text{P}$  からレッドフィールド比を用いて求めた  $\Delta\text{C}$ , さらに  $\Delta\text{C}/\text{P. P.}$  の比をまとめて

Table 3 N/P ratios of load and concentration.

(DIN and DIP)

	Load	in sea water
Tokyo Bay	28.3	25.3
Ise Bay	20.4	17.3
Osaka Bay	22.6	17.1

Table 4 Primary production, DIC emission and its ratio.

	P. P. $\Delta\text{C}$ $\text{gC/m}^2/\text{day}$	$\Delta\text{C}/\text{P. P.}$ %
Tokyo Bay	5.8 0.36	6.2
Ise Bay	1.4 0.020	1.4
Osaka Bay	0.9 0.062	6.9

示した。これを見ると, 東京湾と大阪湾の  $\Delta\text{C}/\text{P. P.}$  はそれぞれ 6.2%, 6.9% とほぼ等しく, 基礎生産量の約 6% が最終的に有機物として海底に堆積するか, 湾外に流出することを示している。伊勢湾の比は 1.4% と小さいが, この値が伊勢湾の栄養塩の物理・化学・生物過程が東京湾・大阪湾と異なっていることを示唆しているのか, 今回の  $\Delta\text{P}$  や基礎生産量の見積もりが不正確なためなのかは現在のところ不明である。

## 5. おわりに

以上東京湾, 伊勢湾, 大阪湾の淡水, 塩分, DIP, DIN 収支を比較しつつ検討することにより, 各湾で共通に起こっていること, 独自に起こっていることをかなりの程度明らかに出来た。今後, DOP, POP, DON, PON のデータもそろえて, 各湾の有機態, 無機態栄養物質の収支を考えることにより, さらに研究を進めたいと考えている。

本稿をまとめるに際して貴重な議論をして頂いた愛媛大学武岡英隆助教授, 名古屋大学才野敏郎教授, ハワイ大学 S. Smith 教授, 貴重なコメントを頂いた査読者の方に感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 蔵本武明・中田喜三郎 (1992) 物質循環モデル。『漁場環境容量』, 平野敏行編, 恒星社厚生閣, 85-103.
- 2) 柳 哲雄 (1997) 沿岸海域の物質収支モデル。『海の研究』, 6, 163-172.
- 3) 宇野木早苗・岸野元彰 (1977) 東京湾の平均的海況と海水交流。理化学研究所海洋物理研究室レポート, No. 1, 89 p.
- 4) 宇野木早苗・岸野元彰・岡見 登 (1974) 伊勢湾の平均的海況と交流要因。『海域汚濁の時間的空間的連続機構に関する研究報告書』, 産業公害防止協会, 31-160.
- 5) 柳 哲雄・柴木秀之・武岡英隆 (1985) 播磨灘・大阪湾の塩分・窒素・リン収支。『沿岸海洋研究ノート』, 22, 159-164.
- 6) 柳 哲雄 (1996) 東京湾・伊勢湾・大阪湾への外洋の影響に関する比較沿岸海洋学のすすめ。『沿岸海洋研究』, 34, 59-63.
- 7) Matsumoto, E (1985) Budgets and residence times of nutrients in Tokyo Bay. In "Marine and Estuarine Geochemistry", ed. by A. C. Sigerro and A. Hattori, Lewis Publisher, Chelsea, 127-136.
- 8) 小倉紀雄 (1985) 東京湾の化学。『日本全国沿岸海洋誌』, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, 410-416.
- 9) 西条八束 (1985) 伊勢湾・三河湾の化学。『日本全国沿岸海洋誌』,

東京湾，伊勢湾，大阪湾の淡水・塩分・DIP・DIN 収支

- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編,528-538.
- 10) 城 久(1985)大阪湾の化学. 日本全国沿岸海洋誌, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, 642-651.
- 11) 門谷 茂・岡市友利 (1988) 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, **25**, 158-164.
- 12) 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.
- 13) 門谷 茂・三島康史・岡市友利 (1919) 大阪湾の富栄養化の現状と生物による N と P の循環. 沿岸海洋研究ノート, **29**, 13-27.
- 14) 中西 弘 (1985) 環境の総合評価と保全へのアプローチ. 「瀬戸内海的环境」, 小坂淳夫編, 恒星社厚生閣, 279-329.
- 15) 小池勲夫 (1993) 微生物. 「東京湾-100年の環境変遷」, 小倉紀雄編, 恒星社厚生閣, 102-117.
- 16) 橋本俊也・山本民次・多田邦尚・松田 治・永末寿宏 (1997) 瀬戸内海の一次生産と海洋構造の関連. 沿岸海洋研究, **35**, 109-114.