

大局的に見た内湾の海水交流

宇野木 早苗*・岸野 元彰**

1. まえがき

陸地に深く切りこんだ内湾は、これを取りまく大気と海底、陸岸と外海、これら4つの境界を通してたえず運動量、熱量、淡水、その他の物質や物理量のやりとりをつづけているが、容量が一般に小さいため、このやりとりの影響を強く受け、海洋の構造は季節的に、また時に短期間に大きく変動している。図-1に、伊勢湾の

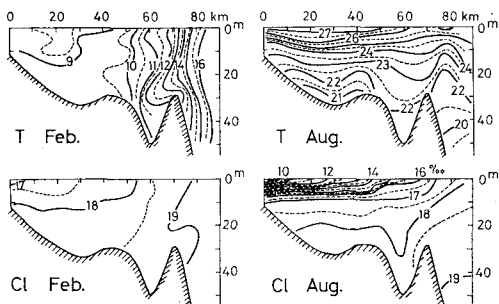


図-1 伊勢湾縦断面における2月と8月における水温 (T) と塩素量 (Cl) の分布。

主軸にそう2月と8月における水温と塩素量の縦断面分布が示されているが、両季節における海洋構造の相違は、著しいものがある。この相違は、海水の循環や交換の強さに反映されているはずであるが、その実態についてのわれわれの理解はまだ乏しい。

内湾水と外洋水の交換の強さは、いろいろな方法で推定されている。ここでは、簡単なボックス・モデルの手法を適用して、大局的に見た内湾の海水交流能力を推定し、その季節変動に注目すると共に、異なる海域を比較して、それぞれの海域の交流特性を明確にしたいと思う。対象海域として、東京湾、伊勢湾、三河湾を取り上げる。

2. 解析の方法

図-2に示す i 番目のボックスの容積を V_i 、物質の濃度または物理量を $\bar{C}_i$ とする。変数の上の $-$ は、ボッ

クスまたは境界面に関する空間平均を表わす。いま単位時間にボックス i から j への物質の輸送量を $Q_{ij}\bar{C}_i$ 、 j から i への輸送量を $Q_{ji}\bar{C}_j$ とすれば、物質の連続式は

$$\frac{\partial \bar{C}_i}{\partial t} V_i = \sum_j (\bar{C}_j Q_{ji} - \bar{C}_i Q_{ij}) + S_i \dots \dots \dots (1)$$

となる。 S_i はインプットまたはボックス内で生成消滅する量である。 Q_{ij} 、 Q_{ji} は輸送係数と言われ正の値をとる。 A_{ij} 断面の平均流速を $\bar{v}_{ij}$ (外向きを正) とすれば、 $\bar{v}_{ij} A_{ij} = Q_{ij} - Q_{ji}$ となる。(1) 式は各ボッ

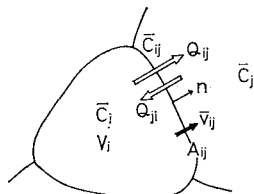


図-2

クスで成り立つので、各ボックス間の輸送係数が求まっているならば、これらの連立微分方程式を解いて、与えられた条件下のボックスにおける平均濃度の時間変化を計算することができる。輸送係数を求めるには、逆に既知の $\bar{C}_i$ や S_i を用いて、(1) 式を連立させて代数的に解けばよい。

一方、連続条件を積分型の拡散方程式で表わせば、

$$\int_{V_i} \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial t} dV = \int_A \left(-vC + K \frac{\partial C}{\partial n} \right) dA + S_i \dots \dots \dots (2)$$

となる。 n は境界面の外向き法線、 K は渦動拡散係数である。 v と C を境界面上の平均値とそれからの偏倚の和として $v_{ij} = \bar{v}_{ij} + v'_{ij}$ 、 $C_{ij} = \bar{C}_{ij} + C'_{ij}$ で表わすと (2) より

$$\frac{\partial \bar{C}_i}{\partial t} V_i = \sum_j \left\{ -\bar{v}_{ij} \bar{C}_{ij} - \bar{v}'_{ij} \bar{C}'_{ij} + \left(K \frac{\partial \bar{C}}{\partial n} \right)_{ij} \right\} A_{ij} + S_i \dots \dots \dots (3)$$

を得る。いま $-\bar{v}'_{ij} \bar{C}'_{ij} + (K \cdot \partial \bar{C} / \partial n)_{ij} = D_{ij} (\partial \bar{C} / \partial n)_{ij}$ として、広義の拡散係数 D_{ij} を定義する。 D_{ij} は渦動拡散の他に、シアの分散効果を含み、一般に分散係数が主体となっている。ここで $\bar{C}_{ij} = (\bar{C}_i + r \bar{C}_j) / (1+r)$ 、 $(\partial \bar{C} / \partial n)_{ij} = (\bar{C}_j - \bar{C}_i) / L_{ij}$ と近似する。 r は $0 \sim \infty$ の値を取り、濃度勾配が一様に近い場合には $r \sim 1$ 、 $Q_{ij} \gg Q_{ji}$ のときは $r \sim 0$ 、 $Q_{ij} \ll Q_{ji}$ のときは $r \sim \infty$ と考えられる。 L_{ij} は適当な空間差分である。これらを (3) 式に代入して、

* 正会員 理博 理化学研究所 主任研究員

** 理化学研究所 研究員

(1) と比較すると

$$Q_{ij} = A_{ij} \{ D_{ij} / L_{ij} + \bar{v}_{ij} / (1+r) \} \quad \cdots \cdots (4)$$

$$Q_{ji} = A_{ij} \{ D_{ij} / L_{ij} - r \bar{v}_{ij} / (1+r) \} \quad \cdots \cdots (5)$$

$$D_{ij} = L_{ij} / A_{ij} \cdot (r Q_{ij} + Q_{ji}) / (1+r) \quad \cdots \cdots (6)$$

となり、輸送係数と拡散係数が関係づけられる。

ボックスの容積を流出または流入の輸送係数で割り、

$$\tau_i = V_i / \sum_j Q_{ij} = \bar{C}_i V_i / \sum_j \bar{C}_j Q_{ij} \quad \cdots \cdots (7)$$

$$\tau'_i = V_i / \sum_j Q_{ji} \quad \cdots \cdots (8)$$

を定義すると、これらは時間の次元をもち、時として海水の滞留時間とか置換時間と言われる。保存性物質に対しても、同様に $\tau'_i = \bar{C}_i V_i / \sum_j \bar{C}_j Q_{ji}$ が定義できる。これらは海水や物質の交換に関係するパラメーターではあるが、交換の速さを一義的に規定するものではないことに注意を要する。例えば、(1) 式で瞬間放出を考え、外に出たものが二度ともどってこないとするれば ($\sum_j \bar{C}_j Q_{ji} = 0$)、 τ_i は、 $S_i = 0$ のとき、濃度が初期濃度の $1/e$ になる時間を表わす。しかし元にもどるものがあれば、初期値の $1/e$ になるにはもっと長い時間を要し、内容が異なってくる。文献 1) では (8) 式を用いているが、ここでは (7) 式で定義された τ_i を用いる。ただ次節で示すように、本対象海域では Q_{ij} と Q_{ji} の差は小さいので、両式で得られる値は、大して変わらない。

3. 解析の結果

東京湾と伊勢湾・三河湾の地形とボックスの区分を図-3 に示す。海洋要素として水温と塩分を考え、東京湾では1947~74年までの約 51 000 個の、伊勢湾・三河湾では1950~73年までの約 26 000 個の資料を用いて、各ボックスの月平均値を求め、またこれに対応して、河川流量、海面への降水、海面からの蒸発の差引きとしての月平均淡水供給量、さらに日射、逆放射、潜熱、顕熱の差引きとしての月平均の海面熱収支量を推定した^{2), 3)}。まずこれらの諸量を (1) 式に適用して、各月間の輸送係数を求める。次に $r=1$ 、 L_{ij} =ボックスの中心間距離と仮定し

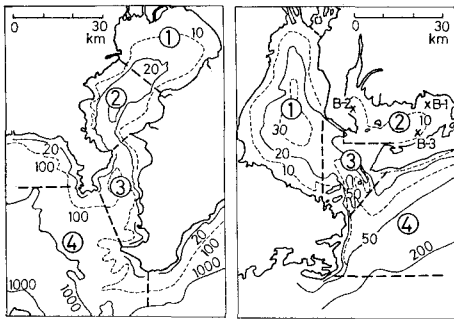


図-3 東京湾と伊勢湾における水深分布とボックス区分、三河湾の B-1, 2, 3 はブイの位置を示す。

て、 D_{ij} を定め、さらに τ_i を計算した。これらの仮定は問題を含むが、考えられる範囲内では、結果のオーダーを変えるものではない。なお、最初海洋の成層構造を考慮して、水温と塩分を用いて二層モデルで検討したが、満足すべき結果が得られなかった。いろいろな原因が考えられるが、特に海面の熱収支量の見積りの精度が良くないためと考えられる。それ故以下では、比較的誤差の少ない塩分を取り上げ、一層モデルで議論する。

(1) 東京湾の場合

計算で求めた Q_{ij} 、 D_{ij} 、 τ_i 等は図-4 に示されている。なお図中の τ_T は、ボックス-1, 2 を含む狭義の東京湾に対するもので、次式で定義されている。

$$\tau_T = (V_1 + V_2) / Q_{23} \quad \cdots \cdots (9)$$

各ボックス間の輸送係数は、季節的にかなり大きく変動し、秋季に大きく、冬季に小さい。またこれらは、海域の断面平均流量を表わす淡水供給量に比して、1桁ないし3桁大きい。拡散係数の値は、断面によってあまり変わらず、 $(2 \sim 11) \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲を季節変動し、年平均はいずれも $5.3 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ の程度である。この値は伊勢湾口で同様に得られる値より小さい。 τ_T の値は0.8~3.5カ月の範囲にあり、やはり伊勢湾の場合にくらべ大きく、東京湾内部はそれだけ海水交換が悪いことを示している。

他方、方法はいくぶん異なるが τ_T に相当する値として杉浦は12月に1.1カ月、5月に0.9カ月を、宇野木は5~6月間に対し1.3カ月を得ている³⁾。図-4の5~6月間の値1.1カ月に両者とも近いが、杉浦の12月におけるものは本節の結果に比べかなり小さい。また松本らが観音崎第1海堡断面で求めた海水交換率を用いて、湾内水の交換時間を見積ると、2, 3月の値として1.7ないし2.3カ月が得られ、図-4の2.65カ月とそれ程違っていない³⁾。

次に、保存性物質を投入したときの濃度変化を調べる。このとき境界条件として、ボックス-4の濃度が必要となる。これが内部の濃度に及ぼす影響を見るため、

$$\bar{C}_4 = k \bar{C}_s \quad \cdots \cdots (10)$$

として、 k が 0~1 まで変化するとき、連続放出の最終

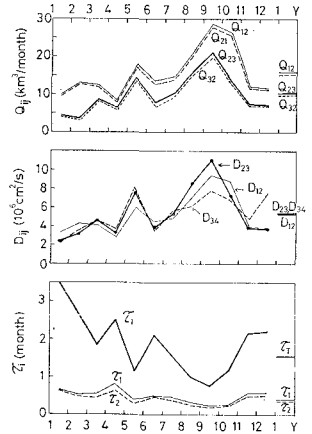
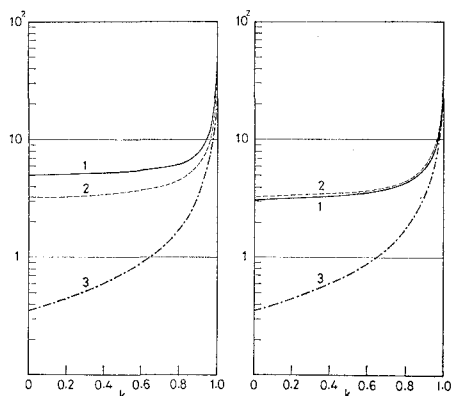


図-4 東京湾における Q_{ij} 、 D_{ij} 、 τ_i の年変化、右端 (Y) は年平均値を示す。



図—5 東京湾における連続放出の最終濃度と k の関係、左はボックス-1 に、右は 2 に投入した場合、年平均の Q_{ij} を用いた場合で、縦軸の濃度は負荷が 1 000 ton/day のときには ppm になる。

濃度がどのように変わるかを計算する。図—5 はその計算例で、年平均の Q_{ij} の場合である。湾内のボックス-1 または 2 に投入し続けた場合、内部の最終濃度は k と共に増大するが、 $k=0.8$ ぐらいまでは、その増加はわずかでほとんど一定である。なお濃度の時間的経過も、 $k=0.8$ まではそう大きく変わらない。このことから、湾内の濃度は湾外の濃度にあまり左右されず、湾内と湾外との交流は弱いことが知られる。よって以下では簡単に $k=0$ の場合を取り扱う。

図—6 に瞬間放出と連続放出の場合の濃度変化が描かれている。前者では初期濃度 C_0 、後者では最終濃度 C_∞ を基準にしている。 Q_{ij} には年平均値を用いている。ボックス-1 または 2 に瞬間放出したとき、その濃度が初期濃度の $1/10$ になるのに約 100 日を必要とする。この値は τ_r の 2.3 倍である。ボックス-2 に投入した場合、かなりの量がボックス-1 すなわち湾奥に運ばれ、結局は湾

奥が最も高くなる。またボックス-2 と 3 の境界において、濃度に著しいギャップがあり、ここを通して交流が行なわれ難いことを示している。これはまた、寒候季にこの付近で、水温、塩分のフロントが現われることにも対応している。連続放出の場合にも、同様な交流特性がうかがわれる。このように東京湾の海水交流が弱いのは、観音崎富津ノ洲間の狭窄部が、幅わずか 6 km と狭く、またこの付近で S 字形に屈曲していることが、大きく影響しているであろう。

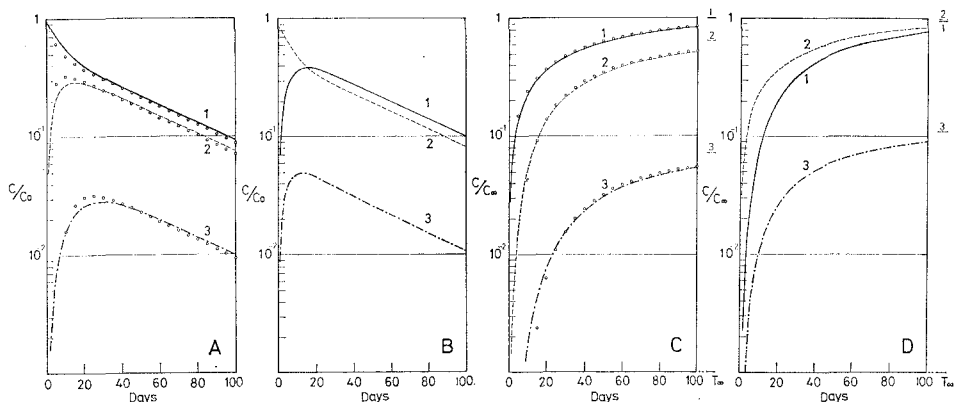
(2) 伊勢湾・三河湾の場合

図—3 のボックス区分で、一層モデルによる計算結果を図—7 に示す。この中の τ_1 は、伊勢湾、三河湾全体に対する滞留時間

$$\tau_1 = (V_1 + V_2 + V_3) / Q_{34} \dots\dots\dots (11)$$

と定義されている。交流の強さの季節変動のパターンは、東京湾と大きく異なり、夏季に大きく冬季に小さい。拡散係数は、伊勢湾口部で $(4.9 \sim 9.8) \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲、三河湾口部で $(1.8 \sim 5.1) \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲を季節的に変動している。年平均値では、伊勢湾は三河湾に比して、輸送係数は 3, 4 倍、拡散係数は 2 倍前後大きい。湾口部の横断面観測から求めた拡散係数も、伊勢湾の方が三河湾より大きい²⁾。湾全体に対する τ_r は、年間に 0.5 ~ 1.0 カ月の範囲を変化し、年平均値は約 0.7 カ月で、容積が大きいにもかかわらず、東京湾の τ_r に比べてかなり小さく、本海域の方が交流が良いことが分る。なお、藤森ら⁴⁾が実測から推定した海水交換率を用いて、 τ_r に相当する時間を見積ると、1 月に対し 2.7 カ月、2 月に対し 1.3 カ月を得る。後者は本節の結果に近い。

年平均の Q_{ij} を用いて、連続放出の最終濃度と (10) 式の k との関係を図—8 に示す。湾内の最終濃度の、外海の設定濃度に対する依存性は、本海域の交流の強さを反映して、東京湾の場合より大きい。塩分濃度からは $k=0.2$ ぐらいが考えられるが、正確な所はよく分らない



図—6 東京湾における濃度の時間経過；A と B はそれぞれボックス-1 と 2 に瞬間放出した場合、C と D はそれぞれ 1 と 2 に連続放出した場合で右端に最終濃度を示す。 $k=0$ で年平均の Q_{ij} を用いている。

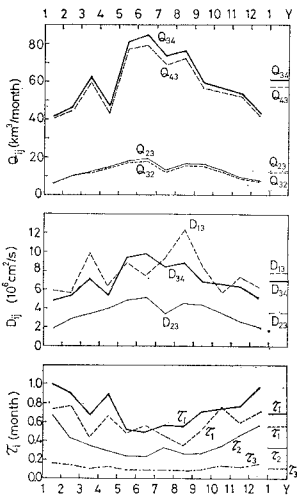


図-7 伊勢湾・三河湾における Q_{ij} , D_{ij} , τ_i の年変化, 右端 (Y) は年平均值を示す。

三河湾は交流能力が比較的弱く、また容積も小さいので、投入された物質は蓄積され易く、高濃度が現われ易い。また、伊勢湾に連続投入したとき、三河湾には伊勢湾の約半分の濃度が見られ、伊勢湾の影響が強いことが注目される。したがって伊勢湾と切り離して、三河湾の海洋汚染を考えるのは問題である。三河湾は伊勢湾にくらべて生産力が高く富栄養化が著しいが、このような交流の特性も一因となっているのであろう。

4. 考 察

一層のボックス・モデルを用いて、東京湾、伊勢湾、三河湾の交流の特性を比較し、さらにこれらが季節的に大きく変動することを示した。しかし成層が強い場合、一層モデルの適用には問題がある。このときは、図-1

ので、以下では簡単のため $k=0$ と仮定する。図-9 に瞬間放出と連続放出の場合の濃度変化が描かれている。伊勢湾に投入したとき、初期濃度の 1/10 になるには 70 日程度を必要とする。三河湾の場合には 1 カ月未満である。今は $k=0$ としているが、現実には外海に出たものが一部もどってくるから ($k \neq 0$)、実際は上記より多少日数は長いであろう。

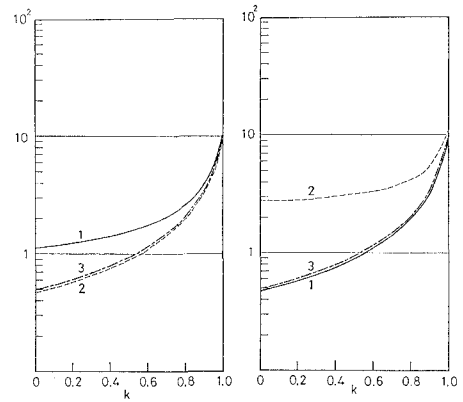


図-8 伊勢湾・三河湾における連続放出の最終濃度と k の関係, 左はボックス-1 に、右は 2 に投入した場合。年平均の Q_{ij} を用いた場合で、縦軸の濃度は負荷が 1000 ton/day のときには ppm になる。

の右側に示すように、海洋要素の分布は水平方向に一様性が強い。一層モデルは、これを人為的に上下に強制混合させたことに対応するから、その結果から生れた水平方向の勾配は、寒候季にくらべ小さい傾向をもつはずであり、見掛け上水平方向の交流が強まったことになる。それ故、成層海洋を一層で近似するのは、結果の解釈が難しく、値の信頼度も低い。

しかしながら、図-4 と 7 の比較から知られるように、両湾とも成層期に同様な見掛けの効果を受けているにもかかわらず、海水交流の強さの季節変動のパターンが、両湾で著しく異なっていることは、上記のモデルの問題点を越えて意味のあるものと思われる。すなわち、強さのピークは東京湾では秋季に、伊勢湾・三河湾では夏季に現われていて、交流に関与する要因が季節的に変化し、その変化の様相が両湾で異なることを示している。

内湾と外洋の水の交換は、内湾の海洋構造の形成と密

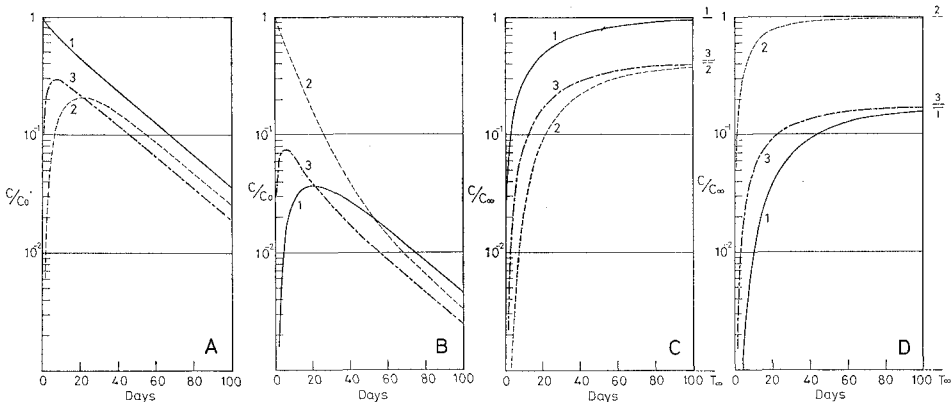


図-9 伊勢湾・三河湾における濃度の時間経過; A と B はそれぞれボックス-1 と 2 に瞬間放出した場合、C と D はそれぞれ 1 と 2 に連続放出した場合で右端に最終濃度を示す。 $k=0$ で年平均の Q_{ij} を用いている。

接に結びついていて、単に湾口部のみでなく、湾全体の流動機構に依存している。したがって上記の事実の解釈には、内湾の流動機構——これには当然外洋の海況も影響しているが——この季節的相違や海域の特長の把握が必要である。これに関して最近、流れはそう強くなくとも多少とも定常的な恒流成分(循環流)が重要であろうとの認識が強まっている⁵⁾。恒流の発生要因としていろいろ考えられるが、通常は河川水の流出と潮汐残差流が考えられている。たしかに東京湾、伊勢湾においても潮汐残差流の存在が否定できない部分もあるが、これだけでは実際は説明しきれない²⁾。

例えば、寒候季の東京湾においては、時計まわりの環流系の存在が観測結果から指摘されているが、長島の数値実験によれば、この時期卓越する北東風による可能性が強いことが知られる⁶⁾。また図-10は、三河湾の3つ

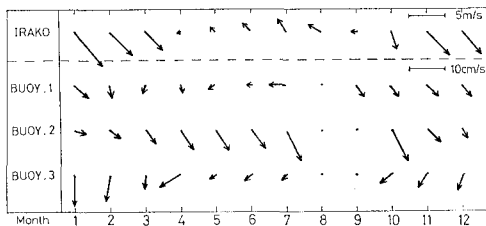


図-10 伊良湖の月平均風と、三河湾1, 2, 3号ブイ(愛知水試所属、図-3 参照)の月平均流の年変化, 1974年⁶⁾。

のブイ(愛知水試所属、位置は図-3 参照)における月平均流と、伊良湖測候所の月平均風の季節変化を示したものである。恒流成分は季節的に著しく変動し、これが平均風と正または逆の相関にあることが認められる。事実、数値実験の結果によると、各ブイにおける恒流の季節変化は、潮汐残差流と各季節の卓越風による吹走流を合成したもので、定性的ながらほぼ説明可能なことが示されている⁶⁾。また閉鎖性の内湾では、海面の加熱や冷却に伴う熱塩循環の効果も、無視できない場合があると推測される。図-11は速藤による数値実験の一例で、淡水流入と海面冷却による鉛直循環を示し、冬季の紀伊水道や東京湾口部などに見られるフロントの存在も暗示している⁷⁾。なお淡水供給量の季節変動は重力対流や熱塩循環の強弱に深く係っている。

以上考えられるいくつかの交流要因について述べてき

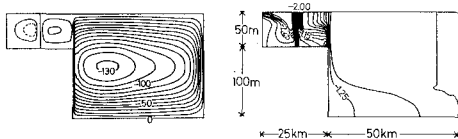


図-11 海面冷却と淡水流入がある場合の熱塩循環の流線(左)と水温(右)の分布, 計算条件は文献7)を参照されたい。

た。ただ問題としている東京湾および伊勢湾・三河湾の各月の交流特性が、それぞれどのような要因の結びつきによって生じ、何故両湾で著しく異なる季節変動のパターンを示すかの量的議論は、今後の重要な興味ある研究課題である。ここでは、ボックス・モデルによる解析結果を提示して、それによると、内湾の海水交流に関して従来余り考慮されなかった風や熱などの要因が、必ずしも無視できないであろうことを示すにとどめる。

5. む す び

一層のボックス・モデルによる解析の結果、定量的には検討を要する点もあるが、次のことが理解できた。

(1) 海水交流の強さは、季節的に著しく変動し、しかもその変動のパターンは、東京湾と伊勢湾・三河湾では明確に異なる。これは従来多くの場合無視されていた要因、例えば風や熱の効果などを考慮する必要があることを暗示している。(2) 観音崎—富津ノ洲より北の東京湾内部は、伊勢湾にくらべてかなり閉鎖性が強く、内部へ投入された物質は外海へ流出し難く、狭窄部で濃度のギャップが見られる。(3) 伊勢湾は東京湾にくらべて交流が良い。しかし三河湾はかなり閉鎖性が強い。また伊勢湾に投入された物質の影響を強く受けている。

謝辞: 本研究にご理解を示された産業公害防止協会、運輸省第二港湾建設局、およびブイ資料の解析にご厚意を賜った愛知県水産試験場に深謝する。

参 考 文 献

- 1) Keeling, C. D. and Bolin, B.: The simultaneous use of chemical traces in oceanic studies, I. General theory of reservoir models, *Tellus*, Vol. 19, pp. 566-581, 1967.
- 2) 宇野木早苗・岸野元彰・岡見 登: 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(第1報), pp. 31-160, 1974; (第2報), pp. 1-88, 1975.
- 3) 宇野木早苗・岸野元彰: 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, *Tech. Rep.* No. 1, pp. 1-89, 1977.
- 4) 藤森研一・稲隆富昌・内田豊彦・園山哲夫: 伊勢湾 水理模型実験と現地調査(第2報)—伊勢湾の海水 交流について—, 第23回海講演文集, pp. 518-523, 1976.
- 5) 国司秀明・宇野木早苗: 内湾の海況, 海洋環境の科 学(堀部純男編), 第2章, 東大出版会, pp. 49-91, 1977.
- 6) 宇野木早苗・吉見吉夫・青山 茂: 三河湾の流れの 季節変動について, 日本海洋学会昭和52年度秋季大 会講演要旨集, pp. 46-47, 1977.
- 7) Endoh, M.: Formation of thermocline front by cooling of the sea surface and inflow of the fresh water, *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 33, pp. 6-15, 1977.