

湾内水の滞留時間の推定

Estimation of bay-water retention time

和田 明*・高野 泰隆**・穂積 照雄***
by Akira WADA, Tairyu TAKANO and Teruo HOIZUMI

Tokyo Bay has been selected as a study area and the bay was divided into 215 blocks in order to analyze the exchange flow between various blocks by applying a non-linear programming method and to identify the characteristics of flows in the bay in four seasons.

The analytical results obtained successfully revealed the occurrence of flow patterns which cannot be expressed by existing simulation analyses, and consequently made it possible to conduct discussion on the environmental values given to each block.

Based on the results of flow analysis, particles were thrown into all boxes in the bay and the tracking of these particles was carried out, in an attempt to evaluate the size of bay-water retention time.

Keywords: Exchange of sea water, box model, retention time

1. まえがき

東京湾の沿岸域では埋め立てが行われ自然海岸域の90%が消失し、陸域からの排水や下水の流入負荷も増大した。また、東京湾は湾口が狭く、外海との海水の入れ替わりの制限された内湾性の海域である。その結果、湾内の水質・底質は著しく悪化し、赤潮、青潮、海水の貧酸素化などが問題になっている。今後は、海水の汚濁を改善するだけでなく、海域環境の復元、快適な海域環境の確保に努めるとともに、海水の利用や海の開発・利用にあたっては、長期的な観点を持った海域環境の評価が必要である。

環境影響の評価の立場から東京湾の流動を把握することは重要であるが、その動的実態の把握がまだ不十分であるように思われる。

東京湾を215のボックスに分割し、それぞれのボックス間の交換流量を解析し、湾内の四季における流動の特徴を求める。解析方法としては、湾内を任意のボックスに分け、各ボックスに塩分、水温を与え、塩分量、熱量、海水量のボックス間の出入りがバランスするような交換流量を求めるものである。

その結果に基づいて、内湾全ボックスに粒子を投入したときの粒子の追跡を行い、内湾水の滞留時間の大きさを評価しようと試みたものである。

-
- * 正会員 工博 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科
(〒424 清水市折戸3-20-1)
** (株)エフ・エイ・エル 企画開発室
(〒152 東京都目黒区目黒本町2-18-5)
*** (株)アーク情報システム
(〒102 東京都千代田区5番町)

湾海域を表-1に示すデータ処理法に基づいて10年間における水温・塩分データを各季節ごとに整理した。それぞれの季節分布を再現するような海水の動き、海水の交換性をボックスモデル解析による方法で計215個のボックス間の水平・鉛直交換流量を算出した。

気象条件としては、陸上部沿岸の測候所のデータをベースに、海上の条件を与えるために表-2に示す項目のデータを収集した。

項 目		単 位 区 分
時間区分		シ ー ズ ン
空間区分	水平区分	緯度2.5', 経度2.5' 毎
	鉛直区分	水深 0 ~ 5 m, 5 ~ 15 m, 15 ~ 25 m, 25 ~ 40 m, 40 ~ 62.5 m, 62.5 ~ 87.5 m 87.5 ~ 125 m, 125 ~ 175 m

収集地点	使 用 項 目	調査機関	収集期間
東京、横浜 千葉、館山	降水量、気温、全日日射量、 風速、雲量、温度	気象庁測候所 (気象月報)	1979～1988

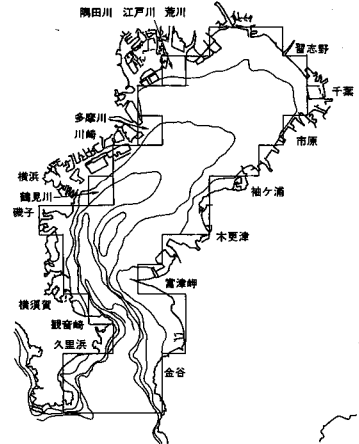


図-1 解析対象範囲

3・1 ボックスモデル

水温、塩分濃度などの観測値をもとに、ボックス間の交換流量を未知数として、ボックスごとに次の3つの方程式をたてる。

- ① 海水の質量の保存方程式
- ② 海水中の塩分量の保存方程式
- ③ 海水の熱量の保存方程式

第一に、未知変数の個数と方程式の個数が一致するとは限らず一意的な解を求めることは難しい。また、モデルの性質上、交換流量が非負（正または零）であることである。このため、解法としては、単なる連立一次方程式法や一般逆行列法を用いることができず、制約条件（非負条件）付きの非線形計画法によらなければならない。すなわち、①～③の方程式を厳密に成立させることはあきらめて、誤差の最小な解を求める。

3・2 ボックス分割

—332—

みなせる（すなわち、温度、塩分濃度、密度が同じであるとみなせる）ような単位で分割することが必要である。

3・3 保存方程式

各ボックスについて、3つの保存方程式をたてる。ボックス*i*に注目して以下のような保存式を考える。（図-2参照）

① 海水の質量保存方程式

$$\sum_{j \neq i} W_{ji} \rho_j - \sum_{j \neq i} W_{ij} \rho_i + \sum_r R_{ri} \rho_r' + P - E = 0 \quad [\text{ton/s}] \quad (W_{ij} \neq W_{ji}) \quad (1)$$

ここに、

$W_{ij} \geq 0$: ボックス*i*からボックス*j*への交換流量 [m^3/s]

ρ_i : ボックス*i*の海水密度 [ton/m^3]

水温と塩分濃度より、クヌードセン式により求めている。

ρ_r' : 河川*r*の河川水密度 [ton/m^3]

クヌードセン式による。

R_{ri} : 河川*r*からボックス*i*への河川水流入量 [m^3/s]

P_i : ボックス*i*への降水量 [ton/s]

E_i : ボックス*i*から大気への蒸発量 [ton/s]

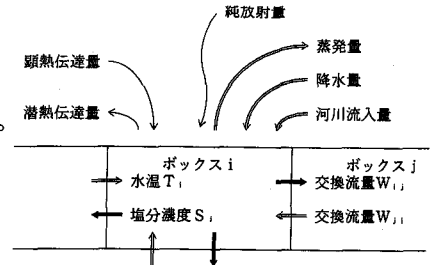


図-2 ボックス間の交換流量

② 塩分の保存方程式

$$\sum_{j \neq i} W_{ji} S_j - \sum_{j \neq i} W_{ij} S_i + \sum_r R_{ri} S_r' (S_i' - S_i) = 0 \quad [\text{ton/s}] \quad (2)$$

S_i : ボックス*i*の塩分濃度 [%]

S_r' : 河川*r*の塩分濃度 [%]

③ 熱量の保存方程式

$$\sum_{j \neq i} W_{ji} \rho_j T_j C - \sum_{j \neq i} W_{ij} \rho_i T_i C + H_i = 0 \quad [\text{Mcal/s}] \quad (3)$$

T_i : ボックス*i*の水温 [$^{\circ}\text{C}$]

H_i : 大気からBox *i*に流入する熱量 [Mcal/s]

C : 海水の比熱 [$\text{cal}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$]、現在は1.0としている。

3・4 非線形計画問題への変換

3・3の非負条件付連立1次方程式を、非負条件付誤差最小化問題に変換する。

$$\begin{aligned} \varepsilon = \sum_i \{ & \alpha_i (\text{Box } i \text{ の質量保存式(1)の左辺})^2 \\ & + \beta_i (\text{Box } i \text{ の塩分保存式(2)の左辺})^2 \\ & + \gamma_i (\text{Box } i \text{ の熱量保存式(3)の左辺})^2 \} \end{aligned}$$

とすると、 ε は交換流量 W_{12} , W_{13} , ...の関数であり、保存方程式の誤差の2乗和である。

交換流量 W_{12} , W_{13} , ...は、非負条件 W_{12} , W_{13} , ... ≥ 0 のもとで、誤差関数 $\varepsilon = \varepsilon(W_{12}, W_{13}, \dots)$ を最小にする W_{12} , W_{13} , ...として求めればよい。

この問題は、通常、NNLS (Non Negative Least Squares) と呼ばれているものである。

4. 解析結果

4・1 既往の知見^{1), 2)}

東京湾内の平均流については、明確な定見はないが以下の調査結果が得られている。

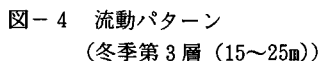
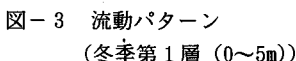
- 平均流のパターンは風のパターンに支配され、秋、冬は時計回りの還流が認められる。夏季は明瞭でない。
- 湾内の神奈川県より上層で幅せまい南下流が存在する。上層は流出、下層は流入する傾向にあり、密度流的鉛直循環がみられる。

(d) 水温・塩分の分布は、混合期と成層期に大別される。混合期の分布は鉛直方向に一樣になる傾向にあるが、底層は高温・高塩分で温度逆転が生じている。この結果、湾口付近では等値線がせまく、海洋フロントを形成する。成層期は、表層付近に躍層が形成されるが、この時期の表層塩分は低く、等値線は水平状を示し高温・低塩分水が表層水をおおっている。

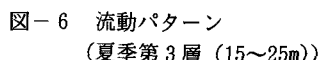
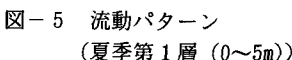
(a) 冬季（図-3および4参照，鉛直流成分については，斜め矢印で表示。）

既往の知見では寒候期の湾内では時計回りの循環が卓越するという記述が多い。

本成果では湾南部で反時計回りの循環を示すが、循環は単純ではない。湾北部で知見とは逆に千葉沿岸に北上流が見られるが、全体にスケールの小さな循環が表現されている。湾北部で見られる循環の移動、分離、流向の逆転などは既存の知見と一致する。また、神奈川沿岸の表層の強い南下流とその下層の北上流も既存の知見と一致する。



夏季の流動は、春季よりさらに成層化の影響を受けて、全般に流動規模が小さくなる。特に上層では、湾内での鉛直方向の流れがほとんど認められなくなる。また、水平方向には、表層（0～5 m）で河川の影響と考えられる南下流が西岸に認められる。湾口部では、上層部とは違い、底層の第4、5層（25～60 m）から第3層（20 m）への湧昇流がみられる。



—334—

冬季の湾口付近における粒子の動きは、湾内外の水深の相違に由来する貯熱容量の違いと思われる重力循環と全く逆向きの、すなわち3層では湾奥に、4層では湾外に向かう鉛直循環が観音崎～富津岬の北側で認められる。この動きをもとに、海洋フロントの成因は基本的には海面冷却に伴う湾内外の水温差と河川流入に伴う塩分差に起因すると考えると、冬季湾口で水温・塩分の分布が密に鉛直に立つ結果とは良く対応している。

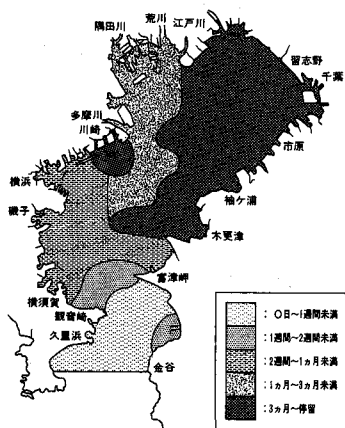


図-9 第1層(0~5m)の滞留時間水塊図<夏季>

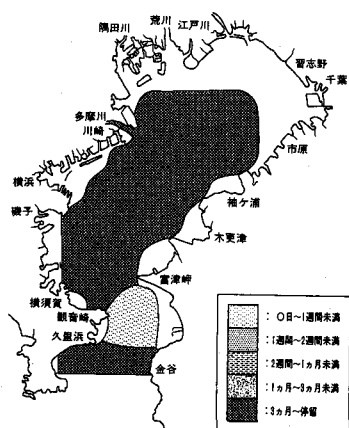


図-10 第3層(15~25m)の滞留時間水塊図<夏季>

停滞期では成層化が顕著で、粒

子の流出が河川水の影響を受ける西岸沿いの南下流に依存しているため、海水交換は表層のみで特に夏季では表層湾西部のみと見るべきである(図-9および10参照)。鉛直方向の分布構造は春季でも成層化傾向にあることがうかがわれ、夏季において上層は流出、下層は流入の成層化が顕著となる。

東京湾における粒子追跡の結果から水粒子の滞留の特徴は、東京湾内部の水深が浅く容量が小さいため、海洋構造と循環の強さは季節的に流動・変動が顕著であり、外部条件の寄与が大きいことを示唆している。この外部条件の寄与の大きさという点では、粒子の動向から見た外洋からの海流分脈の突っ込みは、湾口が狭く湾自体が閉鎖的であるために浦賀水道まではかなり強く見られても湾内部への影響は間接的であると考えられる。

6. 結 論

東京湾内で一年を通しての停滞期、交換期の繰返しは湾内の海洋環境の分布に大きく影響し、顕著な季節変化をもたらす要因となっている。

粒子の流動、並びに滞留水塊の拡がりをもとに海洋環境問題との関連性を評価すると、以下のとおりである。

- 1) 夏季の成層化により湾内の鉛直混合が抑制されるため、底層で貧あるいは無酸素水塊が形成する。本研究の手法を適用することによって、夏季から秋季への移行期において発生する青潮の移行過程を推察できるものと考えられる。
- 2) しかし交換期と言えども、外洋からの流入が隔てられる傾向にあるため東京湾は海水交換率が低く、故に湾内は常に汚染度が高く富栄養化状態にあるといえる。

謝 辞

本文中の膨大な数にのぼる粒子の追跡計算を実行した、当時海洋土木工学科4年生桑原教樹(㈱日建技術コンサルタント)、瀬川秀樹(㈱中部)および堀井隆(日本基礎工業㈱)の各氏の協力に厚く御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 国司秀明・宇野木早苗(1977): 第2章内湾の海況, 堀部純男編「海洋環境の科学」, 東京大学出版会
- 2) 長島秀樹(1975): 東京湾の恒流 — 風に起因して, 理研シンポジウム