

2002年東京湾の海水の滞留時間と マルチボックス鉛直1次元モデルを用いた 再現計算

Residence time of sea water in Tokyo Bay at 2002 and reproducing residence time with
multi-box vertical one dimensional model

高尾敏幸^{1,2}・岡田知也³・中山恵介³・古川恵太⁴

Toshiyuki TAKAO, Tomonari OKADA, Keisuke NAKAYAMA and Keita FURUKAWA

¹正会員 工修 国土技術政策総合研究所 交流研究員 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

²正会員 工修 (株)エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野二丁目6-4)

³正会員 工博 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

⁴正会員 工修 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

The aims of this paper are to estimate the residence time of sea water in Tokyo Bay from field observation results and to apply the multi-box vertical one dimensional model (MEL1D-MB) to reproduce the salinity distribution. The field observation was carried out at 27 points inside of Tokyo Bay one or two times per month from July 2002 to June 2003. The residence time of sea water was obtained by using the salinity from the field observations and the estimated fresh water which flows into Tokyo Bay. The residence time is found to be 45-60 days in winter and 15-35 days in summer, respectively. The application of the MEL1D-MB was carried out and the reproduced salinity distribution comparatively agreed with the observational results. The residence time obtained from the MEL1D-MB also agreed with the residence time from the field observations.

Key Words : Tokyo Bay, residence time, fresh water, river discharge, enclosed bay, stratified field

1. はじめに

海水交換は湾内における物質の循環を大局的に把握するのに適した指標の一つであり、宇野木・岸野¹⁾や柳・高橋²⁾によって観測値に基づいた検討が実施されている。宇野木・岸野¹⁾は塩分の観測値を用いたボックスモデルにより塩分の保存式と質量の保存式の関係から海水の交換量を求め、それから海水の滞留時間を算出している。この海水の滞留時間は大局的に見た場合の外洋水との海水交換能力を意味している。一方、柳・高橋²⁾と宇野木³⁾は塩分の観測値から湾内の淡水存在量を調べ、これと淡水流入量との関係から解析的に淡水の平均滞留時間を算出している。この淡水の平均滞留時間は淡水の湾内に滞留する平均的な時間を意味している。両者の定義は異なるものの、両者ともに内湾の海水交換を示す指標の一つである。

1947年～1974年の観測値に基づいた宇野木・岸野¹⁾の

計算によると、東京湾の海水の滞留時間は季節変動が大きく0.8ヶ月～3.5ヶ月の範囲にあることを示している。また、宇野木³⁾は河川水の湾内における平均滞留時間は冬は2.7ヶ月、夏は1.0ヶ月であって、夏の方が短いことを指摘している。しかしながら、埋立や浚渫等によって湾内の水域面積および体積は大きく変化しているため、海水の滞留時間は変化している可能性がある。なぜなら、海水の滞留時間は潮汐振幅および潮流振幅に強く依存し、潮汐および潮流は湾内埋立ての影響によって変化していることが宇野木・小西⁴⁾や柳・大西⁵⁾によって示されているためである。宇野木・小西⁴⁾は湾内の埋立により東京の潮汐振幅が6 %減少し、湾口の潮流振幅は11 %減少したことを解析的に示している。また、柳・大西⁴⁾は湾内の埋立により湾奥の潮汐振幅は8 %減少し、湾口部の潮流振幅は35 %減少したことを数値実験により指摘している。さらに、海水の滞留時間は淡水の流入量や湾内の成層状態によっても影響される³⁾ので、淡水の流入量の

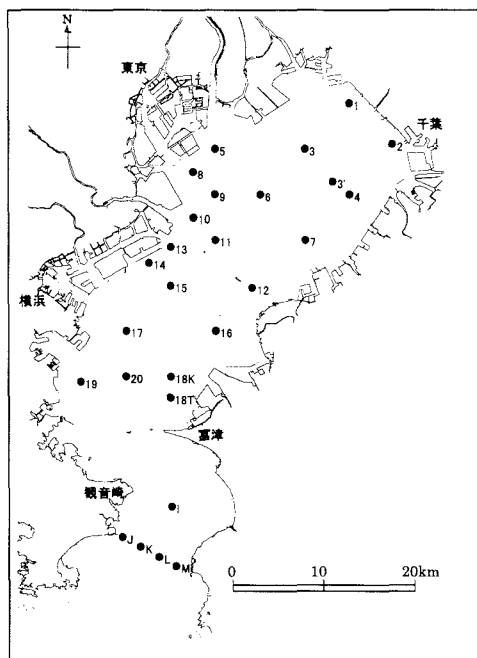


図-1 東京湾広域環境調査における観測地点

1974年以前からの変化に伴い海水の滞留時間は変化している可能性もある。

そこで、本研究では、2002年7月から2003年6月に実施された東京湾広域環境調査データを用いて、2002年の海水の滞留時間を算出する。また、内湾水域面積の変化や淡水流入量の変化を考慮し長期に渡る海水の湾内の滞留時間および物質循環の変遷を検討できるモデルを目指したマルチボックス鉛直1次元モデル (MEL1D-MB⁶⁾) の再現性を得られた海水の滞留時間を用いて検証する。

2. 観測データ

国土技術政策総合研究所では2002年7月から2003年6月にかけて東京湾広域環境調査を実施した。観測項目は水質、底質、生物および流速等多項目に及んでいる。調査項目の詳細およびデータは (<http://www.nilim.go.jp/>) を参照して頂きたい。本検討では、上記のデータセットの中の水温および塩分のデータを用いた。水温および塩分の観測にはアレック電子社製のクロロテック (ACL1183-PDK) を用いた。観測地点は図-1に示す東京湾の27地点である。鉛直方向には表層から底層 (水深50 mを超える地点は最大50 m) にかけて1 m毎に測定した。測定は基本的に月に2回実施した。

3. 海水の滞留時間の算出に用いた観測データ

東京湾を一つのボックスと考え、湾内の淡水存在量、淡水流入量を整理し、海水の滞留時間を算出した。

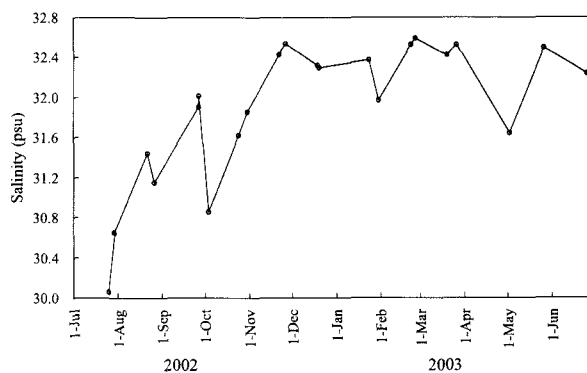


図-2 湾内の平均塩分の季節変化

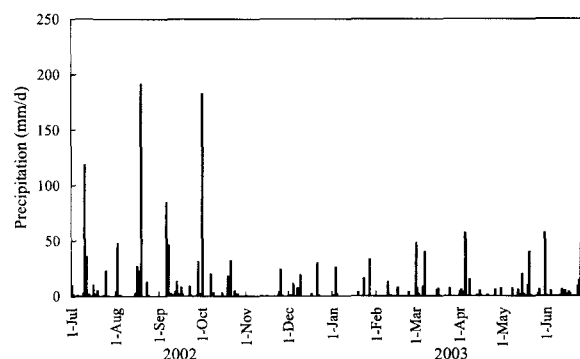


図-3 青森における日降水量の季節変化

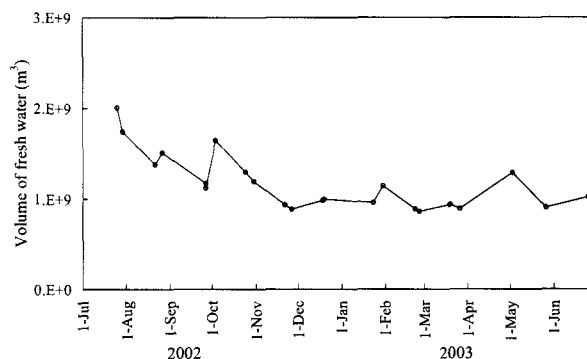


図-4 湾内の淡水存在量の季節変化

(1) 湾内塩分

図-1に示す観測地点の塩分を用いて湾内の空間平均塩分を算出した。湾の境界は、宇野木・岸野⁷⁾に合わせ富津と観音崎を結ぶラインとした。湾内の空間平均塩分の算出は観測地点の空間的な偏りを排除するため、湾内を水平方向に1 km×1 km、鉛直方向に1 m間隔にグリッドを設定し、空間補間により各格子での塩分を求め、得られた各格子塩分を空間平均することにより求めた。空間補間にはガウス関数を用いた。このときの初期の相関距離は7 kmにとり、影響半径内 (相関距離と同一とした) に観測地点が3点以上存在しない場合は相関距離をさらに1 km増やした。観測水深50 mを超えるような地点はひとつ上の層の値を直接与えた。

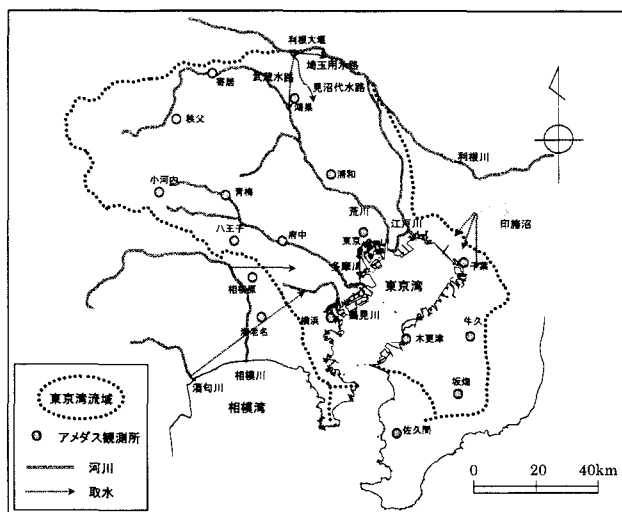
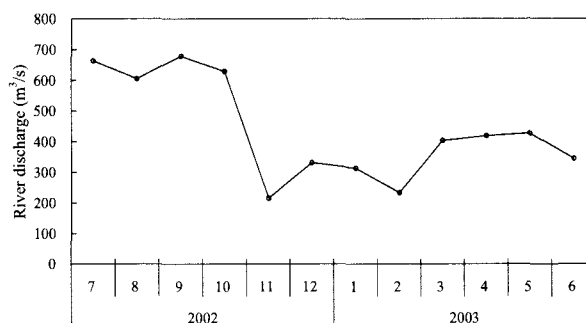
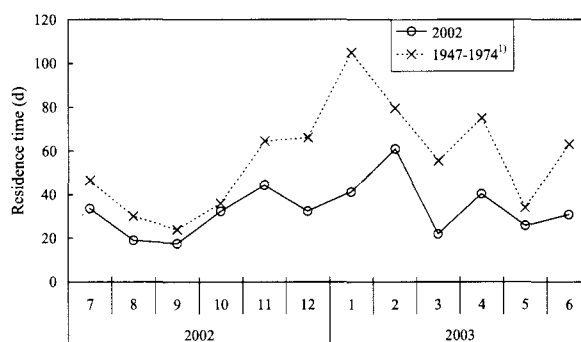


図-5 東京湾の流域およびアメダス観測所地点

得られた湾内の空間平均塩分の時系列を図-2に示す。平均塩分は、10月と5月に急激な減少が見られるが、季節的な変化としては、夏季に低く、冬季に高い傾向を示す。短期的な塩分の変動は、降水量の増加が原因と考えられる。図-3に多摩川上流域に位置する青梅(図-5参照)の日降水量の季節変化⁷⁾を示す。これから、10月上旬に観測された塩分の急激な減少は9月末～10月1日の降雨による影響と考えられるが、5月の塩分の急激な減少と降水量の関係はそれ程明確ではない。



図一6 推算された東京湾に流入する淡水量の季節変化



図一7 海水の滞留時間の季節変化の2002年と1947から1974年の平均¹⁾の比較

質への水道・工業用水道)，印旛沼からの取水・排水である。このうち，本検討の対象期間の江戸川流量は現時点では公開されていないため，過去における利根川上流に位置する前橋の月降水量⁸⁾と江戸川上流の西関宿の月平均流量の関係で得られた回帰直線式と対象期間の前橋の降水量を用いて推算した。③の海域への直接降雨を起源とする淡水流入量は降水量－蒸発量により算出した。降水量は東京湾に面した横浜，新木場，千葉，木更津の平均降水量に海域面積を掛けて，蒸発量はバルク式⁹⁾を用いて算出した。

上記の3つの過程を考慮して得られた淡水流入量の月平均値の季節変化を図-6に示す。2002年7月から10月にかけての淡水流入量は $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上であるが、11月から2月にかけては $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度に減少する。そして、3月から5月にかけて再び $400 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える流量となる。年平均の淡水流入量は $441 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、松村・野村¹⁰⁾ が各河川の下流における流量および下水処理排水量等を考慮して算出した1997年4月から2年間の東京湾の淡水流入量の年平均値 $433 \text{ m}^3/\text{s}$ とほとんど同じ値となっている。

(3) 海水の滞留時間

上記した湾内の平均塩分・淡水流入量を用いて宇野木・岸野¹⁾と同様に海水の滞留時間を算出する。算出には塩分の保存式(2)、質量の保存式(3)の関係を用いる。式中の未知数に該当する Q_{io} 、 Q_{oi} は湾内と湾外の間の海水交換量(輸送係数)と呼ばれる¹⁾。湾の体積を海水交換

図-4に湾内の淡水存在量の季節変化を示す。湾内の淡水存在量の算定には、空間平均塩分と式(1)を用いた。

$$Q = \frac{S_o - S_i}{S_o} V_i \quad (1)$$

ここで、 Q :湾内淡水存在量、 S_o :外洋塩分(=34.5 psu)、 S_i :湾内の空間平均塩分、 V_i :湾の体積($1.56 \times 10^{10} \text{ m}^3$)である。外洋塩分は内湾に比べ塩分の季節変化が小さいため、全期間を通じて一律34.5とした。湾内の淡水存在量は平均塩分の季節変動に同調して、夏季に多く、冬季に少ない傾向を示す。

(2) 淡水流入量

東京湾の主な淡水供給源は①流域（図-5参照）への降雨，②流域外からの流入水および取水，③海域への直接降雨である。このうち，①の流域への降雨を起源とする淡水流入量は，降水量に基づいて流域を幾つかの地域に分割し，図-5に示すアメダス観測地点における降水量を地域毎に整理し，これに地域面積と流出率を掛けて算出した。流出率は東京湾研究会⁷⁾を参考にして荒川流域と多摩川流域に0.6，その他の流域には0.65を与えた。

②の流域外からの流入水・取水を起源とする淡水流入量の主なものは、江戸川（利根川からの分水）、利根大堰（東京・埼玉の都市用水・農業用水として利根川から取水）、酒匂川、相模川等からの取水（横浜・川崎・横須

表-1 主な計算条件

項目	分類	内容
時間ステップ	CFL条件	100 s
地形	水平	図-8参照
	鉛直	2 m間隔(最大30層)
気象	雲量, 日射量, 蒸気圧, 気温, 風速	2001年1月~2003年7月 1ヶ月移動平均
淡水流入量	流域降雨, 流域への流入・取水, 海域への降雨	2001年1月~2003年7月 月平均流入量
海象	M ₂ 分潮	対象潮: 平均潮
開境界	潮汐振幅	34 cm(湾奥で約48 cm)
	水温	[表層] 冬季13.0 °C, 夏季25.0 °C
		[底層] 冬季13.0 °C, 夏季17.0 °C
	塩分	冬季33.75, 夏季34.0
海面	熱フラックス	① 太陽からの短波放射 ② 海洋からの長波放射 ③ 海水からの潜熱輸送・顕熱輸送

量 Q_{io} で割り式(4)で示される滞留時間を算出する.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} V_i = -C_i Q_{io} + C_o Q_{oi} \quad (2)$$

$$R = Q_{io} - Q_{oi} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{V_i}{Q_{io}} \quad (4)$$

ここで, C_i : 湾内の空間平均塩分, C_o : 外洋塩分, V_i : 湾の体積, R : 淡水流入量, Q_{io} : 湾内から湾外への海水交換量, Q_{oi} : 湾外から湾内への海水交換量, τ : 海水の滞留時間である.

式(4)で得られる海水の滞留時間は湾内の塩分が定常な場合には淡水存在量 ($V_i \times (C_o - C_i)/C_o$) を淡水流入量 R で割った淡水の滞留時間と一致する. 観測は基本的に月2回であるが観測間隔が等間隔でないため, 本検討では図-2に示す塩分の経時変化を1年周期の曲線で近似し, 近似された経時変化から各月初めの平均塩分を与えた. 式(2)左辺の時間変化項は対象月とその翌月の初めの月平均塩分から, その他の項は対象月中旬の塩分, 対象月の平均淡水流入量を与えた.

得られた海水の滞留時間の季節変動を図-7に示す. 季節変動に注目すると, 夏季に最も短く20日程度を示し, 秋季から長くなり, 冬季に最も長く50日程度になる. そして, その後春季にかけて再び短くなる. 宇野木・岸野⁹⁾が算出した1974年以前の観測値から算出された海水の滞留時間は夏季に30日程度, 冬季には90日程度に及んでいた. 両者を比較すると, 2002年の結果は1年を通じて

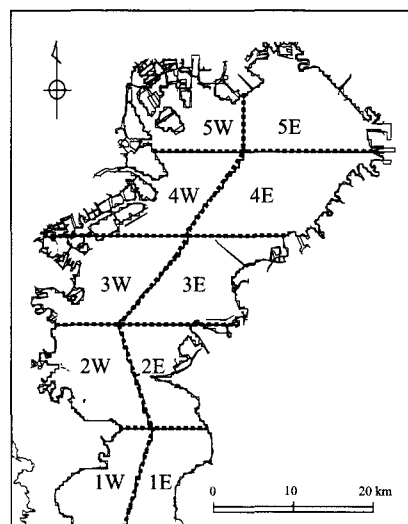


図-8 ボックス分割

短く, 特に冬季に顕著に短い傾向を示している. また2002年の結果は冬季の滞留時間が小さいため, 1974年以前の結果よりも季節変化の差が小さくなっている.

4. MEL1D-MBの東京湾への適応とその再現性

MEL1D-MB⁶⁾を用いた数値計算により2002年7月~2003年6月に観測された塩分の再現計算を試みた. また, 再現計算結果から海水の滞留時間の算出を行い, 海水の滞留時間の再現性について検証を行った.

(1) 基礎方程式

計算に使用したMEL1D-MBは, 有限体積法により静水圧近似のN-S方程式を解くモデルであり, 各ボックスを鉛直方向に細かく分割することで, 成層場の再現性を高めており, これを水平方向に連結し, 水平流速, 水平拡散を計算するマルチボックス型の鉛直1次元モデルである. 本モデルは長期間の計算を短時間の計算時間で行うことができる特徴を持つ.

水平流速は鉛直方向に一樣な潮流成分と鉛直方向に非一樣で, 鉛直積分するとゼロとなる傾圧成分を分離して計算した. このとき淡水流入による効果は水温・塩分の濃度変化として与え, 質量として与えていない. これは前述したように, 東京湾の滞留時間は夏季で約1ヶ月, 冬季で1ヶ月~3ヶ月のオーダーであるのに対し, 湾の体積を淡水流入量で割って得られる交換時間は夏季で半年, 冬季で数年となり, 滞留時間よりも1桁大きいために無視できると考えたからである.

拡散モデルには, 鉛直方向に2方程式, 水平方向に0方程式の乱流エネルギーが考慮されている. しかし, 乱流モデルだけでは表層の混合層を十分に表現することができなかった. この原因として, ボックス内に実在する波浪による混合といったものを表現できていないことがあ

表-2 東京湾環境調査の観測地点と各ボックスの関係

BOX	Station	BOX	Station
5W	5, 8	5E	1, 2, 3
4W	9, 10, 11, 13	4E	3', 4, 6, 7
3W	15, 17	3E	12, 16
2W	19, 20	2E	18K, 18T
1W	J, K	1E	I, L, M

げられる。そこで、これまで経験的に季節変動を与えたり、一定値で与えたりすることが多かった混合層厚に関して次のモデルを追加し再現性の向上を試みた¹¹⁾。式(5)に表層混合層の計算式を示す。

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{R_i} \cdot \frac{C_E - 2C_F}{C_E + C_F} \cdot C_N^3 \cdot \sqrt{C_S \frac{\rho_a}{\rho_w}} \cdot |W| - w_I \quad (5)$$

ここで、 h :表層混合層厚、 R_i :リチャードソン数、 ρ_a :空気の密度、 ρ_w :海水の密度、 W :風速、 C_E C_F C_N C_S :係数(それぞれ1.15, 0.25, 1.13, 0.0015)、 w_I :表層混合層厚の減少項である。

通常、湖沼などでは混合層厚の発達のみを取り扱うが、ここでは混合層厚の減衰として w_I を付加した。式(5)中の R_i および w_I はそれぞれ

$$R_i = \frac{g(\Delta\rho/\rho)h}{u_*^2}$$

$$u_*^2 = C_S \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot W^2 \quad (6)$$

$$w_I = \frac{h_{mean}}{\tau}$$

ここで、 g :重力加速度、 $\Delta\rho$:表層混合層と底層の密度差、 u_* :摩擦速度、 h_{mean} :平均水深、 τ :滞留時間である。

(2) 計算条件

計算対象期間は2001年1月～2003年7月とした。気象・海象条件等の境界条件のデータは計算対象期間と一致するデータを用いた(表-1参照)。

a) 地形

計算に用いる地形を図-8に示す。東西に2分割、主軸方向である南北方向に5分割した。計算では湾口部にさらに一つボックスを設定し、これを湾口の開境界とした。鉛直方向には最大水深を60 mとし、2 m間隔に分割し、最大30層に設定した。

b) 気象・海象

海面熱収支に関する気象条件は気象庁⁸⁾による東京の平均気温、雲量、日射量、蒸気圧、風速の日データを用いた。淡水流入量は図-5で示したアメダスデータを用いて3章で示した方法により求めた。潮汐・潮流に関しては、本計算では東京湾で最も卓越するM₂分潮のみを用いた。

c) 境界条件

湾口境界で与える潮位振幅は34 cmを与えた。この時の湾奥のBOX5の潮位振幅は東京湾奥の潮位振幅とほぼ同じ48 cmを示した。

湾口境界で与える水温・塩分の値はBOX 1およびBOX 2の再現性を考慮して設定した。

海面での境界条件は、太陽からの短波放射、海洋からの長波放射、海水からの潜熱輸送・顕熱輸送を考慮した海面熱収支を計算して与えた⁹⁾。

(3) 再現計算

a) 水温・塩分

図-9と図-10にBOX4における塩分の観測値と計算値の鉛直プロファイルを示す。比較は2002年夏季(7月～9月)、2002年冬季(12月～2月(2003年))で行った。観測値はボックス内の観測地点(表-2参照)を季節毎にまとめて、各水深での平均値と標準偏差を求め図化した。観測の標準偏差は、夏季および冬季ともに3ヶ月分であることによる観測時期による偏差および同じボックス内での空間的な偏差を表している。

成層化が顕著な夏季に関して、表層の計算値は観測値の平均値と一致せず相対的に高塩分の傾向を示しているが、観測値の標準偏差内には納まっている。中層以深の計算値はほぼ平均と一致している。したがって、全水深としては計算結果は観測値と比較的良好一致を示していると言える。一方、成層が弱い冬季に関して、全水深に対して比較的良好一致を示していると言える。

観測値から算定した平均塩分と計算で得られた平均塩分の時系列を図-11に示す。計算値は2002年7月から8月の低塩分は再現できていないが、2002年冬季から2003年春季にかけては観測値とほぼ一致している。この夏季の低塩分を再現できていない原因は図-9で示したように夏季の表層において計算値が観測値の平均値よりも相対的に高塩分になっているためであると考えられる。

b) 海水の滞留時間

計算結果に式(2),(3),(4)を適用して海水の滞留時間を求めた。内湾の範囲はBOX2-BOX5としている。海水の滞留時間は1日毎に算出された値を月平均した。図-12に計算によって得られた海水の滞留時間と観測によって得られた海水の滞留時間の比較を示す。計算値は、月程度の時間スケールに対する値のばらつきは表現できていないものの、夏季に短く(約20日)、冬季に長い(約50日)傾向を示しており、この季節変化は観測値とほぼ一致している。このことから、MEL1D-MBは海水の滞留時間の季節変化は再現できていると言える。

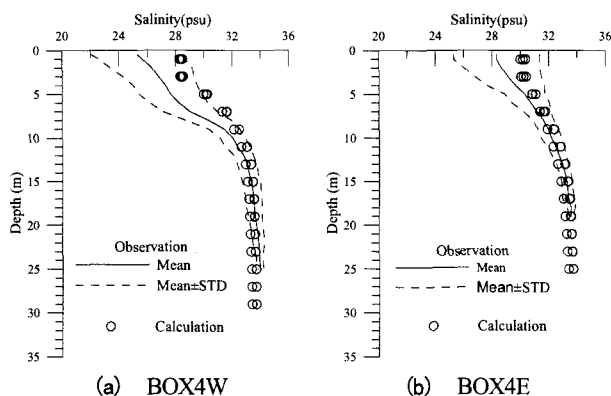


図-9 2002年7月, 8月, 9月の塩分の観測値(線)と計算値(白丸)の比較。計算値は各月の15日の値を示している。

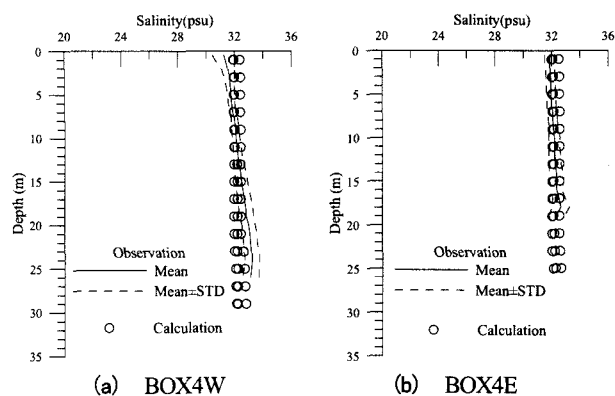


図-10 2002年7月, 8月, 9月の塩分の観測値(線)と計算値(白丸)の比較。計算値は各月の15日の値を示している。

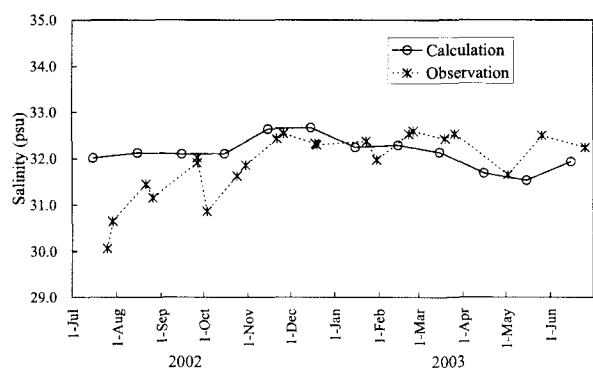


図-11 平均塩分の季節変化の観測値(破線)と計算値(実線)の比較

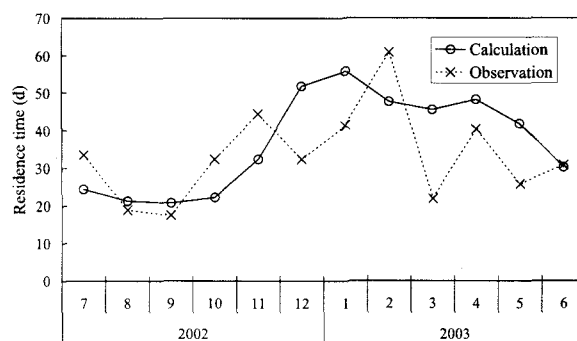


図-12 海水の滞留時間の季節変化の観測値(破線)と計算値(実線)の比較

5. おわりに

湾内27点かつ年間22回におよぶ広域的な観測によって2002年夏から2003年春までの東京湾の海水の滞留時間を各月毎に算出した。その結果2002年の東京湾の海水の滞留時間は、冬は約50日、夏は約20日であったことが示された。この値は宇野木・岸野¹⁾が算出した1974年以前の海水の滞留時間と比べて短く、季節変動も小さいと言う特徴を持つ。ただし、宇野木・岸野¹⁾の結果は数年間の平均像であるのに対して、今回の結果は単年の結果であることは留意しなければならない。つまり、この比較結果のみから近年の東京湾の海水交換は以前と比べて格段に向上したとは断言できない。今後、数値モデルを用いた感度解析や長期計算を行って、種々の要因との因果関係の明確化および海水の滞留時間の長期間の変遷を明確にする必要があると考える。それには、今回検討した長期計算が短時間で可能なMELID-MBは非常に有用な解析手段の一つであると考えられる。

参考文献

- 1) 宇野木早苗, 岸野元彰: 大局的に見た内湾の海水交流, 海岸工学講演会論文集, Vol. 24, pp. 486-490, 1977.

- 2) 柳哲雄, 高橋暁: 大阪湾の淡水応答特性, 海と空, Vol. 64, No. 2, pp. 1-8, 1988.
- 3) 宇野木早苗: 内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係, 海の研究, Vol. 7, No. 5, pp. 283-292, 1998.
- 4) 宇野木早苗, 小西達男: 埋め立てに伴う潮汐・潮流の減少とそれが物質分布に及ぼす影響, 海の研究, Vol. 7, No. 1, pp. 1-9, 1998.
- 5) 柳哲雄, 大西和徳: 埋め立てに伴う東京湾の潮汐・潮流と底質の変化, 海の研究, Vol. 8, No. 6, pp. 411-415, 1999.
- 6) 中山恵介, 岡田知也, 宮野仁, 古川恵太: 内湾の環境評価を目指したMELID-MBモデルの構築と東京湾への適用, 海洋工学シンポジウム論文集, Vol. 16, pp. 59-66, 2001.
- 7) 東京湾研究会: 東京湾を診断する(特集), さかな, Vol. 21, pp. 1-55, 1978.
- 8) 気象庁: 気象庁月報CD-ROM, 2001.1-2003.7.
- 9) 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 1994.
- 10) 松村剛, 野村英明: 貧酸素水塊の解消を前提とした水質の回復目標, 月刊海洋, Vol. 35, No. 7, pp. 464-469, 2003.
- 11) Imberger, J. and J. C. Patterson: Physical Limnology, Advances In Applied Mechanics, Vol. 27, Academic Press, Inc., pp. 303-353, 1990.

(2003. 9. 30受付)