

東京湾奥における出水時の河川水挙動 に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON MASS TRANSPORT DUE TO FLOOD AROUND THE HEAD OF TOKYO BAY

西田有佑¹・中山恵介²・石川忠晴³

Yusuke NISHIDA, Keisuke NAKAYAMA and Tadaharu ISHIKAWA

¹学生会員 工修 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4 2 5 9)

²正会員 工博 国土技術政策総合研究所 主任研究官 沿岸海洋研究部
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³フェロー会員 工博 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

It is necessary to grasp the behavior of the river water which gives pollution load, because of the design of the water quality improvement policy of Tokyo Bay where the deterioration advances. So this paper examined the flow characteristic of river water around the head of the Tokyo Bay in the flood using numerical simulation and satellite image. First, the pattern of advective diffusion of the river water was caught from LANDSAT image, and second it was simulated numerically by MEL3D which is a three-dimensional model. As the result, flow pattern of the surface layer which has appeared in the satellite image was recreated well with MEL3D. Finally, the relationship between hydrologic and meteorologic condition and behavior of river water was examined by the calculate condition systematically changing, it was shown that the flow of surface which is generated by the wind around the head of Tokyo Bay influenced the advective diffusion of the river water.

Key Words : Tokyo Bay, LANDSAT image, numerical simulation, flood

1. はじめに

東京湾は湾長約 60km に対し湾口が 6km と狭い典型的な閉鎖性水域である。湾奥には荒川、江戸川、多摩川などの大河川が流入し、人口約 2750 万人の首都圏及び後背地からの排水を運ぶため、特に湾奥での富栄養化が著しい。実際、八木らによれば¹⁾、湾内の *Chl-a* と河川流量の間には、水質の悪化する夏季から秋季にかけて明確な相関が認められる。したがって、東京湾での水環境改善の立案にあたっては、湾奥に流入する汚濁負荷の輸送および蓄積の過程を把握することが不可欠であると考えられている。

そこで本研究では、最大の流入河川である荒川からの出水濁水の挙動を、以下のように調べた。まず過去の Landsat 衛星画像から荒川出水を捉えているシーンを検索し、濁水の平面的挙動を調べた。続いて、その様子を数値シミュレーションにより再現するとともに、流れの

3次元構造を考察した。最後に、風や潮汐などの環境条件を系統的に変化させてシミュレーションを行い、各因子が河川水の移流拡散に及ぼす影響を調べた。

2. 衛星画像解析

秋ヶ瀬取水堰（河口から35km）の日流量を1984年から2002年の19年間にわたって調べた主要な出水の期間を同定

表-1 秋ヶ瀬取水堰における衛星画像撮影日の日流量と前5日の平均放流量

衛星画像撮影日	前5日 平均放流量 (m ³ /s)	衛星画像撮影日 日放流量 (m ³ /s)
1986/8/6	423.2	193.3
1999/7/25	120.5	82.4
2000/7/11	551.7	231.8
2000/9/21	88.0	44.0
2001/6/4	51.4	22.0
2001/8/23	337.6	486.7

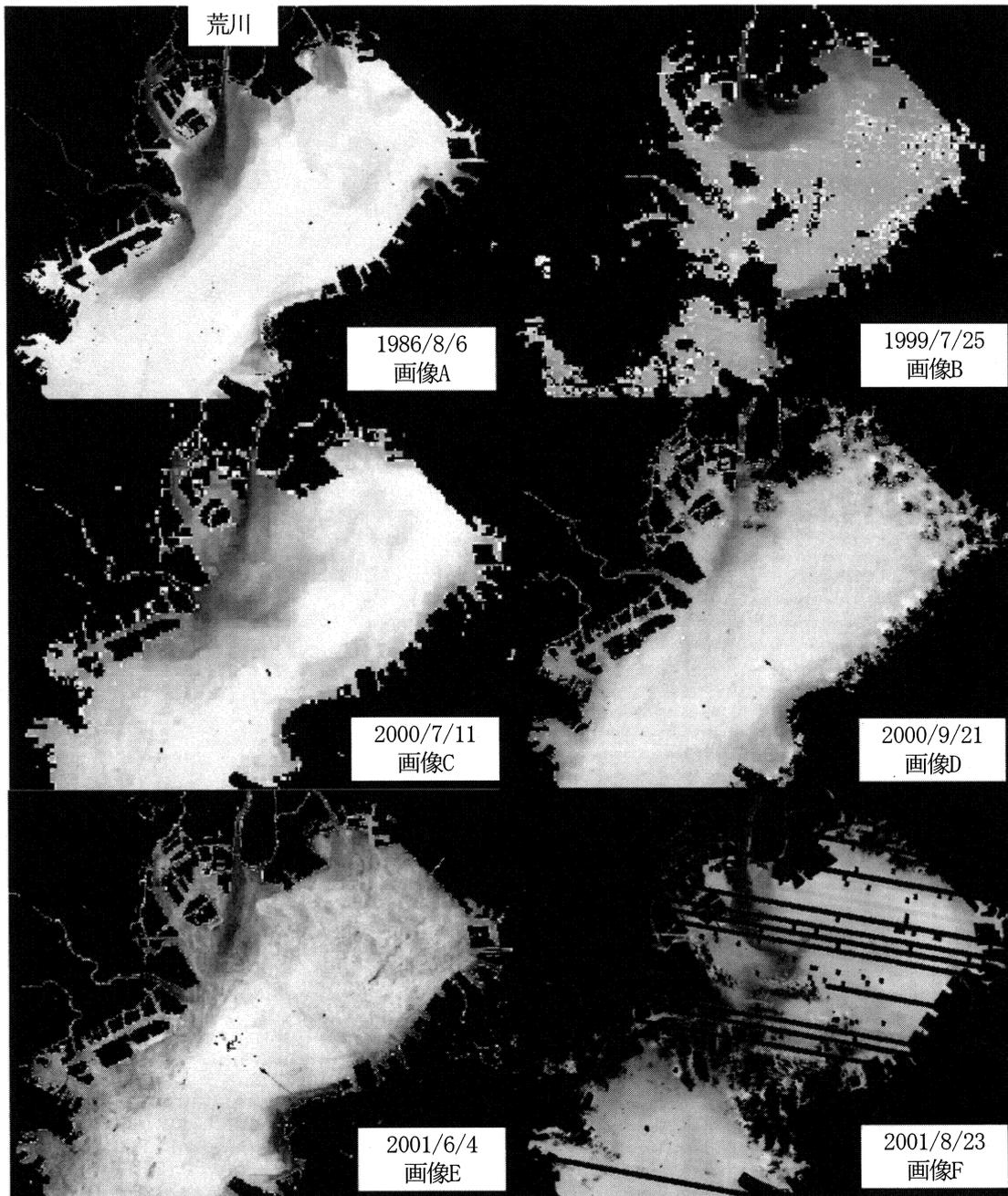


図-1 Landsat画像 (Band2)

した後、Landsat5のTMデータおよびLandsat7のETM+データをクイックルック画像で検索し、東京湾内における荒川からの濁水の挙動が比較的明確に把握できるシーンを抽出した。表-1に解析対象の衛星画像撮影日と日流量および前5日の平均流量を示す。

河川からの濁水の把握にはBand2データ(波長0.52から0.60 μm)が適していると言われている。そこで、「ジオコーディング・画像の切り出し」、「メディアアンフィルター(3 \times 3)」、「マスク処理」の前処理を行った後、Band2データのCCT値を、最も濁度の高い河口部で1、湾口外部で0になるように基準化し、湾内における濁水の広がりを可視化した。規格化には、式(1)を用いた。その結果を図-1に示す。

$$\tau = \frac{T_s - T}{T_s - T_R} \quad (1)$$

T_s : 湾口外部の Band2 の輝度値
 T_s : 荒川河口の Band2 の輝度値
 T : 任意地点の輝度値

河川出水の表面流況は次の2つに大別できる。1つは、河口から東京湾西岸(川崎側)を南下するパターン(画像A, C, D, E, F)、1つは北東方面(浦安方面)へ流軸を変化させるパターン(画像B)である。このような表面流況の違いの発生原因および流れの内部構造の相違を、3次元非静水圧LESモデル(MEL3Dモデル^{2),3)})を用いた数値シミュレーションより検討した。

3. 再現計算

(1) MEL3Dモデルの概要

湾内に放流される河川流量が多い場合、河川水の広がりにはフロントをともなった密度流であると考えられる。そこで、河川水の挙動を再現するため、3次元非静水圧モデルのMEL3D^{2),3)}を用いて解析を行った。MEL3Dは、流れと水温、塩分を非静水圧の基、3次元空間にて解くことができるモデルである。乱流モデルには、Second-Order Closureの代数方程式から導かれたプラントル数を用いることにより、成層効果による鉛直渦拡散係数の変化が考慮されている。また、タイムスプリッティングを行い、移流項にはCIP法を、拡散項には有限体積法を用い、圧力のポアソン方程式の解法には残差切除法を用いている。

計算メッシュ数は60×45×30であり、1km×1km(水平)、3.5m~1.0m(鉛直)で与え、時間ステップは50秒とした。

(2) 湾内成層状態の作成

MEL3Dモデルで実際の流況の再現計算を行うにあたり、湾内の塩分水温状態を与える必要があるが、現地観測データは極めて限られている。そこで、計算負荷が小さいMEL1D-MBモデル⁴⁾を用いて、湾内の初期状態を与えることとした。このモデルは有限体積法により静水圧近似の*N-S*方程式を解き、ボックス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。また各BOXを鉛直方向に細かく分割することで、成層場の再現性が高いという特徴をもっている。

図-2のように東京湾を10個のBOXに分割し、鉛直方向は表層の4メッシュを1m、それ以降を4mに層分割した。最深部の層は18である。気象庁HPをもとに、日平均の気温、相対湿度、風速風向、日照などをBOX毎に与えた。また、淡水流入量(主要河川の流量、下水処理場排水、海面への直接降雨)の時系列を、国土交通省、水資源機構のデータおよびアメダスなどをもとに作成し、該当するBOXの表層に与えた。湾口での境界条件は、塩分については一定、水

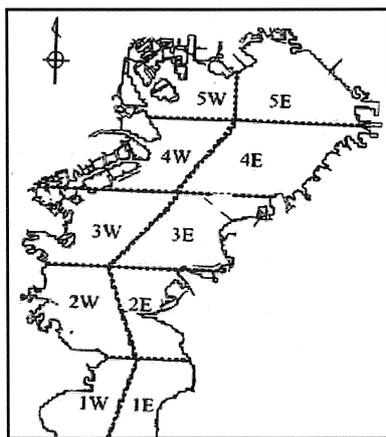


図-2 MEL1D-MBのBOX分割

温については正弦波で季節変化するものとした。

MEL1D-MBモデルの精度を検証するために、国土技術政策総合研究所が広域観測を実施した2002年7月から2003年7月までの成層状態を上述の方法で計算し、観測データ¹⁾と比較した。その結果を図-3に示す。水温については両者が良く一致している。塩分については計算結果がやや過大評価する場合が認められる。しかし、密度流計算で重要となる“河川水との密度差”における見積もり誤差は最大でも20%であることから、本モデルで成層状態を与えて差し支えないものと判断した。

(3) 気象条件・流入条件

気象条件は、東京での時間平均の気温、相対湿度、日照時間、全天日射量を一律に与えた。風の空間分布は、東京湾周辺の9地点のアメダス観測値(三浦・横浜・羽田・東京・新木場・船橋・千葉・木更津・館山)から、式(2)に示す距離依存の重み付き平均により空間内挿を施した。

$$u_i = \sum_{k=1}^N U_k e^{-d_{i,k}/p} / \sum_{k=1}^N e^{-d_{i,k}/p} \quad (2)$$

u_i : 格子*i*における推算風ベクトル
 U_k : アメダス観測点*k*における風ベクトル
 $d_{i,k}$: 格子*i*とアメダス観測点*k*との距離
 N : アメダス観測点の数
 p : 相関距離

湾内水温・塩分の初期条件は、前節で算出したMEL1D-MBの計算結果を風速同様に、距離依存型の重み付き平均で内挿して与えた。湾口境界条件における潮汐には、緯度34度55分、経度139度49分に位置する布良で観測された実測値を与え、水温・塩分には湾口境界条件の初期値を一定で与えた。江戸川、多摩川、鶴見川の流量は、河口付近の流量観測所における実測値で与え、荒川の流量は、秋ヶ瀬取水堰からの放流量に、貯留関数法にて算出した残流域(約1000km²)からの流出流量と荒川河口にて合流する中川の流量を足し合わせて与えた。

荒川河口に位置する葛西水質観測所での濁度デー

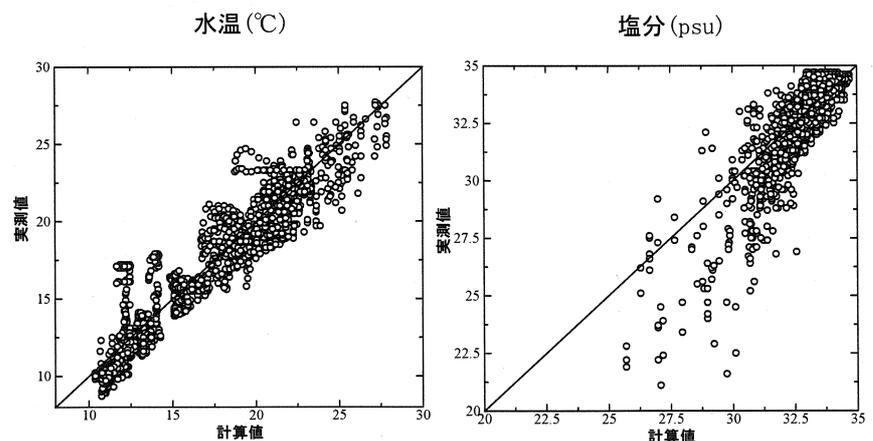


図-3 MEL1D-MBの計算結果と現地観測結果との比較

タが存在する 1999 年 7 月 25 日(Case1), 2000 年 9 月 21 日(Case2)の 2 ケースを対象に, 濁度をトレーサーとして河川水の広がり再現計算を行った. 計算結果を衛星画像と比較すると, 表層での濁度の広がりを良く再現できていた(図-1 と図-4). しかし, 地形境界の条件を再現するにはメッシュサイズが粗く, Case1 における北側への濁度の輸送が過小評価であったことを記しておく. Case1, Case2 における濁度の輸送機構の違いを解明するため, 荒川河口から南へ 10.0km の流速, 濁度, σ_t の鉛直分布を衛星画像撮影時刻において調べた(図-5). Case1 では, 2 日前から強い南西の風が卓越して吹いていた(図-

6). この南西の風により荒川河口部表層の高温・低塩分の軽い海水が湾奥部へ吹き寄せられ, 下層の高密度水が湾奥から湾中央へと流れることで荒川河口域において鉛直に密度が一様となったことが分かった. 濁度に関しては, 吹送流により北東方面へ輸送されていた(図-4.A と図-7.A). 一方で北東の風が卓越する Case2 の場合には, 表層の高温・低塩分の軽い海水が湾奥から南方向へ輸送されていた. 北東の風は, エスチュアリー循環を促進させる方向に吹く風であり, 南西の風と比較して下層における湾奥へ高密度の海水の侵入を抑制する働きが小さかったことが分かった(図-5.F). これにより Case1 と大きく異なり, 下層部には湾中央部から濁度の低い海水が潜り込み, 下層の濁度はリモートセンシングから得られる表層の濁度に比較して小さく現れたことが分かった.

潮汐の影響を検討するために, Case1において風速, 河川流量を与えず, 湾奥での潮汐残差流(図-7.B)を調べたところ, 湾奥の荒川河口域において約1.0cm/s程度であり, 潮汐が河川水の長期的輸送に与える影響は風や河川流量と比較し小さいことが分かった.

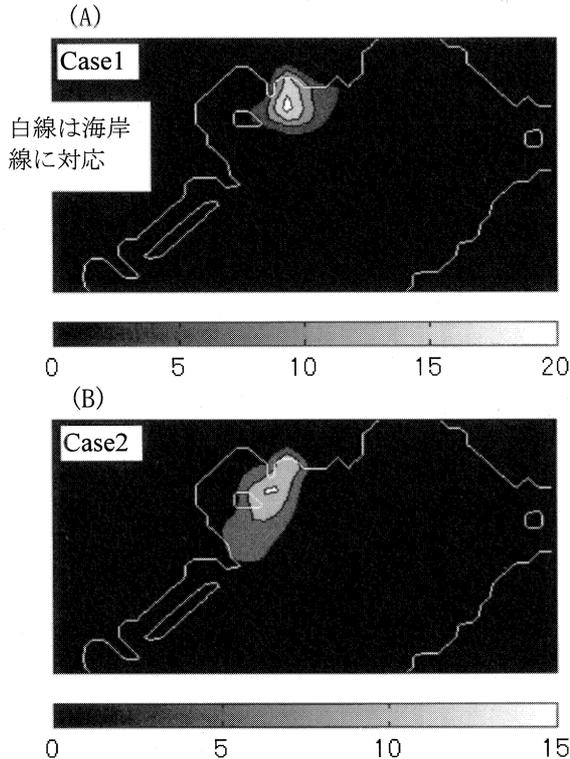


図-4 MEL3Dによる表層濁度の再現計算結果
(a)Case1 [1999/7/25], (b) Case2 [2000/9/21]

4. 荒川出水の湾内拡散の数値実験による検討

(1) 計算条件

河川水の広がりに対する風と河川流量の影響を把握するために表-2に示す外力を系統的に与えて数値シミュレーションを行った. 流量は試験的に 200m³/s, 500 m³/s, 1000 m³/sの3ケースを考慮し, 河川水の濁度は25.0mg/L, 水温は25.0°Cの一定値を与えた. 風の分布は, 過去10ヵ年(1994-2003)の7-9月に東京湾湾奥部において卓越した風向2ケース(図-8)の平均風速と風なしの3ケースを考慮した.

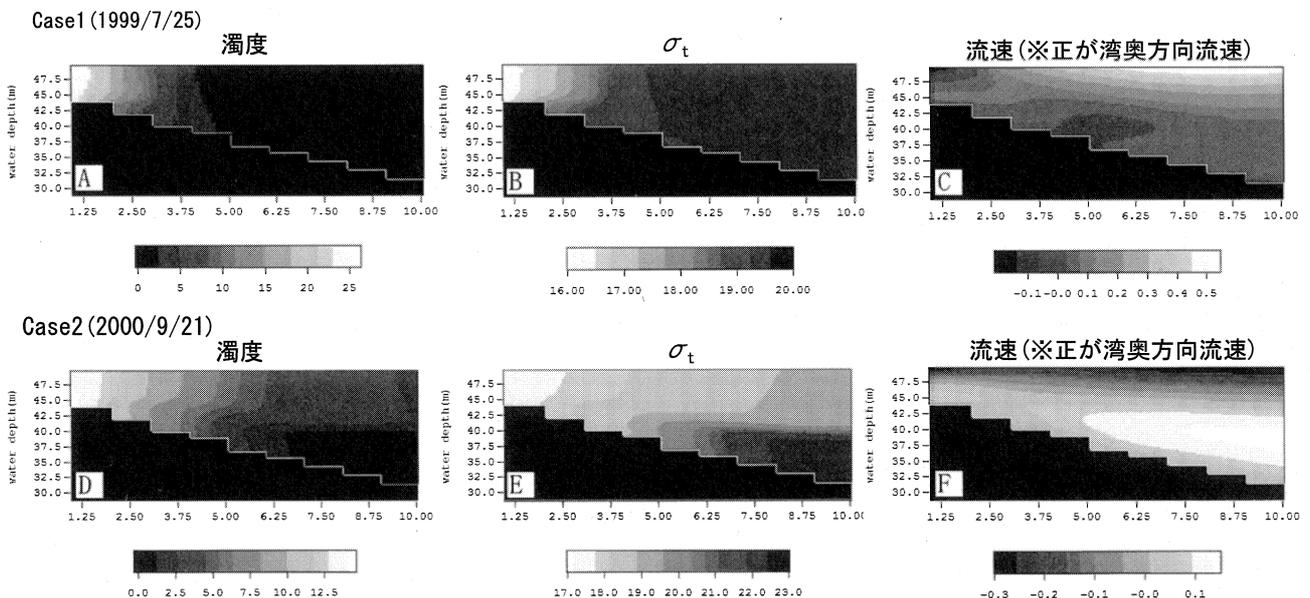


図-5 Case1, Case2 における濁度, σ_t , 流速の鉛直分布

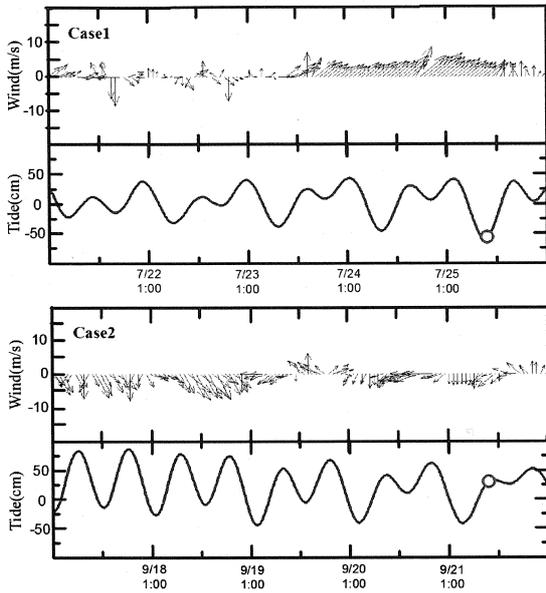


図-6 Case1, 2の風ベクトル(東京)と潮汐(布良)

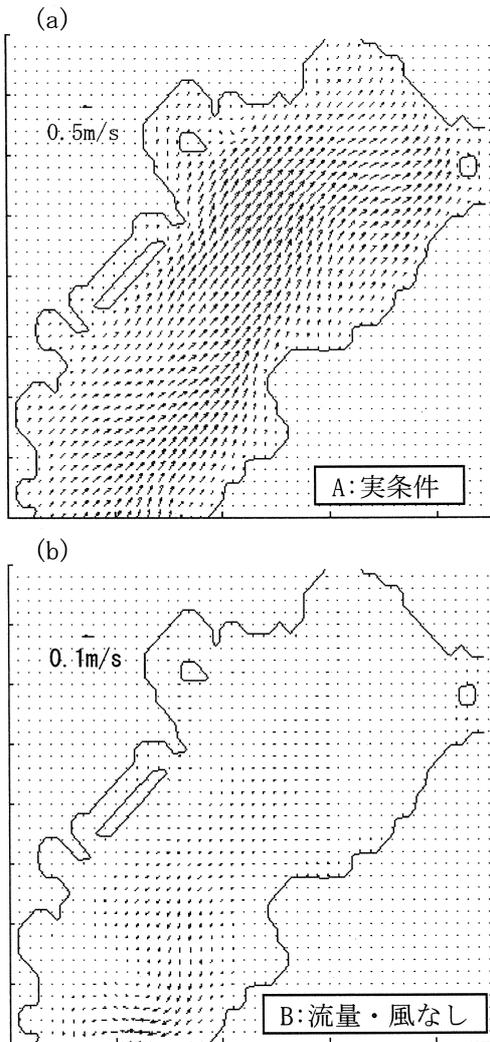


図-7 Case1における表層残差流ベクトルの比較 (a)実条件, (b)流量・風なし

湾口潮汐には千葉県館山市の南部に位置する布良のM2分潮を与え、気温などの気象条件には夏の代表と

表-2 水文条件

風向 (西:0°南:90°)	風速 (m/s)	流量(m³/s)		
		200	500	1000
風:0	0	Case3	Case4	Case5
風:50°	4.11	Case6	Case7	Case8
風:-150°	2.28	Case9	Case10	Case11

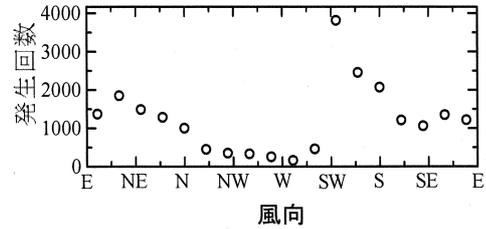


図-8 10カ年(1994-2003)において湾奥で計測された1時間毎の風向の発生回数

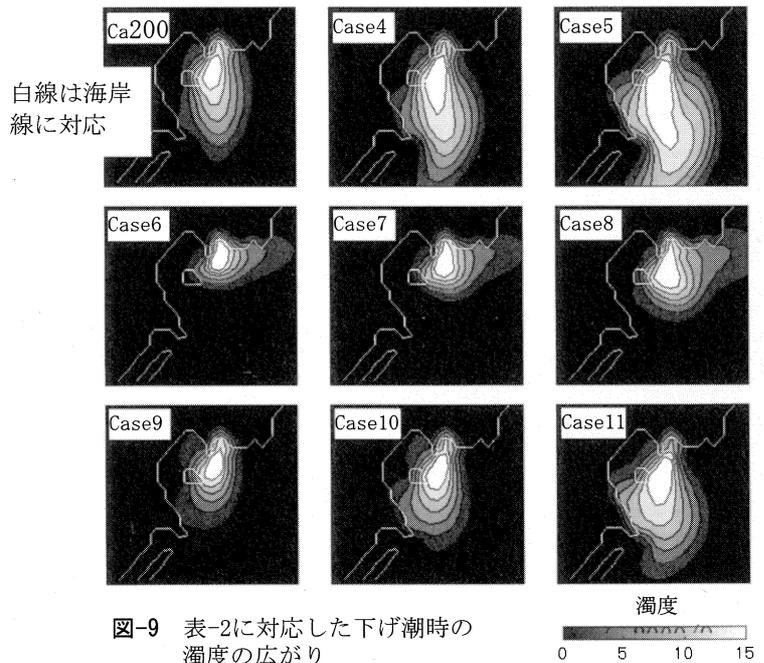


図-9 表-2に対応した下げ潮時の濁度の広がり

してCase1のものを利用した。湾内の初期水温・塩分はMEL1D-MB によって算出した2002年7-9月の平均値で与えた。

(2) 計算結果

図-9に下げ潮時のピークにおける表層濁度の広がり計算結果を示す。全てのケースにおいて流量が増すと、濁度の南方への輸送距離が長くなるのが分かった。また、風によって表層の濁度の広がりに大きな影響が発生することが確認された。特筆すべきは、北東風が与えられているCase9~11である。北東風は、表層の濁度の南方向への輸送を促進するのではないかと予想されたが、濁度の南方向への広がりには、風なしのケースと比較して輸送距離が短くなるのが分かった。その原因を解明するために、Case4とCase10において荒川河口から南へ10kmの濁度、 σ_t の鉛直分布を調べてみたところ(図-10)、風

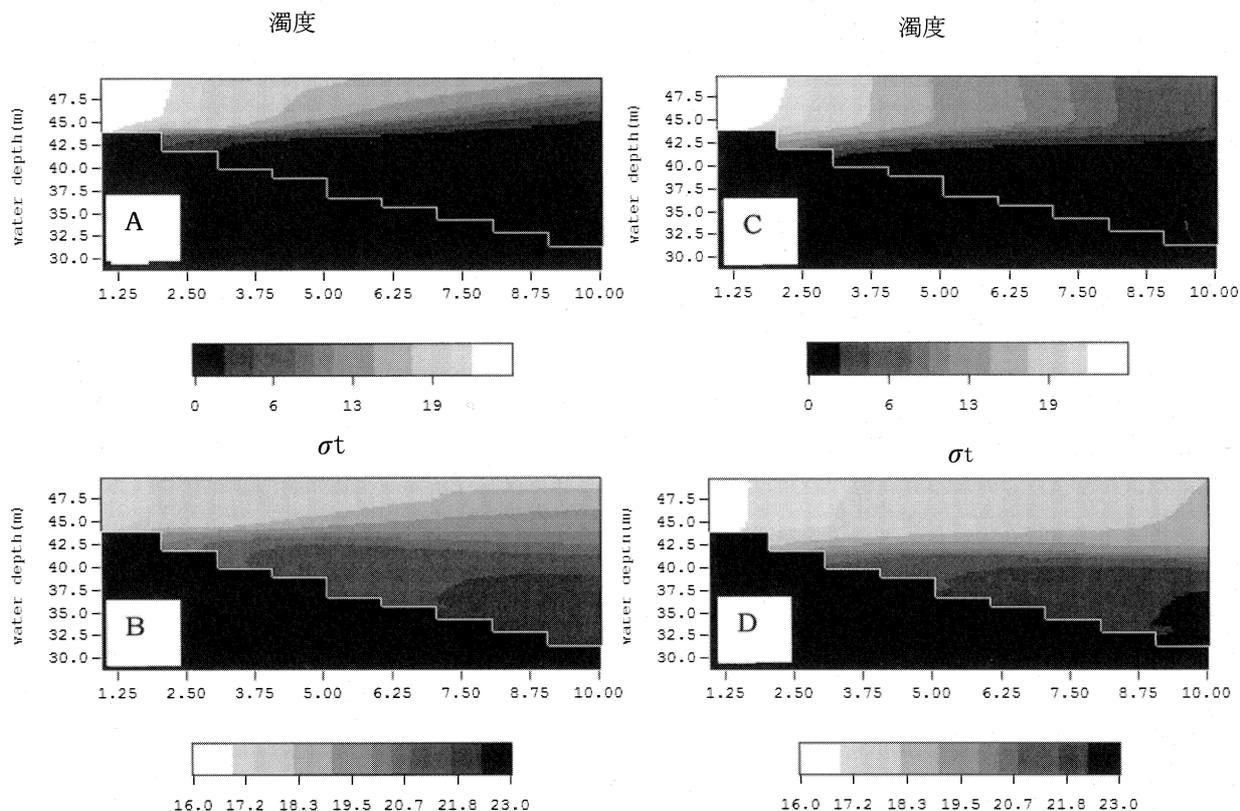


図-10 Case4(A&B), Case10(C&D)における濁

無しの Case4 に比べて、北東風を与えた Case10 における鉛直混合が発達していたことが明らかになった。注目すべき点として、与えた風速は大きくなかったが、河川からの出水による表層付近での成層強度の弱まりのため、鉛直混合が促進されたと考えられる。つまり、風応力によって鉛直混合が発達すると河川濁度の鉛直拡散が促進され、濁度の水平面における影響域が風なしのケースに比べて小さくなることが分かった。

5. おわりに

荒川からの河川水の広がりについて3次元非静水圧モデルのMEL3Dを用いて数値実験を行なった結果、以下の結論を得た。

- (1) 東京湾湾奥に位置する荒川からの河川水の広がりには、東京湾左岸沿いに南下していく流れと浦安方面に流軸を曲げられ輸送されるケースの2パターンがあり、その要因として風が大きく作用していることが分かった。
- (2) MEL3Dを用いて衛星画像撮影日の表層濁度の広がりを定性的に再現することができた。

- (3) 荒川河口部での河川水の広がり鉛直構造を調べた結果、南の風による低密度水の吹き寄せによって河口部で密度が鉛直に一樣になることが分かった。
- (4) 表層濁度の広がりには、流量が一定値である場合、風のない場合に比べて風による鉛直混合により、濁度の水平輸送が抑制されることが分かった。

参考文献

- 1) 八木宏, 鯉渕幸生, 日向博文, 灘岡和男: 東京湾湾奥部の水環境に与える河川水の影響について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.986-990 1998.
- 2) Nakayama K., Comparisons of using CIP, compact and CIP-CSL2 schemes for internal solitary waves, International Journal for Numerical Methods in Fluids, in press, 2005.
- 3) Nakayama K., T. Okada and M. Nomura, Mechanism responsible for fortnightly modulations in estuary circulation in Tokyo Bay, Estuarine Coast and Shelf Science, Vol.64, pp.459-466, 2005.
- 4) 高尾敏幸, 岡田知也, 中山恵介, 古川恵太, 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, 水工学論文集, 第48巻, pp.1243-1248, 2004.