

1	正会員	博(工)	(独法) 水産総合研究センター水産工学研究所 水産土木工学部水産基盤グループ環境水理チーム長
2		D.Eng	東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻
3	フェロー	工博	東京工業大学大学院教授 情報理工学研究科情報環境学専攻
4			国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所環境課長
5			国土交通省港湾局振興課 専門官
6	正会員	博(工)	(独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海洋研究領域長

上に設定された観測点（T1～T8：湾軸ライン，A1～A23：横断ライン）において多項目水質計を中心とした計測を行い，水温，塩分，濁度，蛍光光度，DOの湾軸断面・湾横断面分布計測を2007年6月～10月の期間に合計14回実施している（大潮期6回，小潮期8回）．本調査結果に基づいて，八木ら（2008）では貧酸素水塊の挙動について詳しく検討を行っているが，ここでは，懸濁物質に関係が深い濁度についてその空間分布や変動の特徴を把握すること試みた．

(2) 現地観測結果

はじめに，全14回の観測結果を平均した濁度の断面分布を図-2に示す．これを見ると，表層，底層に相対的に濁度が高い領域が存在しており，湾軸方向には湾奥側で，湾横断方向では湾西岸側で濁度が高い傾向がある．このうち表層については，同時に計測した蛍光光度との相関が表層で高くなる傾向が得られており，植物プランクトン及びそれに由来した懸濁物質が支配的であると考えられる．

次に，各回の観測結果から濁度と塩分，水温等の断面分布の関係を調べると，湾口側から湾内下層に進入している低温高塩分水の先端部分で濁度が上昇するケースが見られた．特に，8月中旬には，低温高塩分水の先端部から湾内の広い範囲の底層～中層に相対的に濁度の高い層が分布する現象が観測された．図-3は，この現象の発生前後の期間（2007年8/14～9/4）の濁度の湾軸断面分布，湾横断分布を塩分，DOの湾軸断面分布とともに示したものである．これを見ると，8/14には表層，底層で濁度が相対的に高い分布であったものが，8/23には湾軸断面では羽田沖の水深20m程度の地点から横浜本牧沖周

辺まで，湾横断面では多摩川沖から対岸の盤洲沖方向に中層（水深20m程度）で相対的に濁度が高い層が広がっており，8/28も濁度レベルは低下するものの中層の懸濁層が維持され，9/4には解消していることがわかる．

八木ら（2008）では，2007年8月後半に東京湾口周辺に低温高塩分水の水塊が波及，これが湾内底層に進入することで，内湾域の広い範囲に中層貧酸素水塊が形成されたことを示した．中層の懸濁層はこれに連動した形で発生しており，図-3に示したDOと濁度の空間分布を比較すると，中層懸濁層は中層貧酸素水塊とよく対応している．このことは，低温高塩分水の外海水の進入が貧酸素水

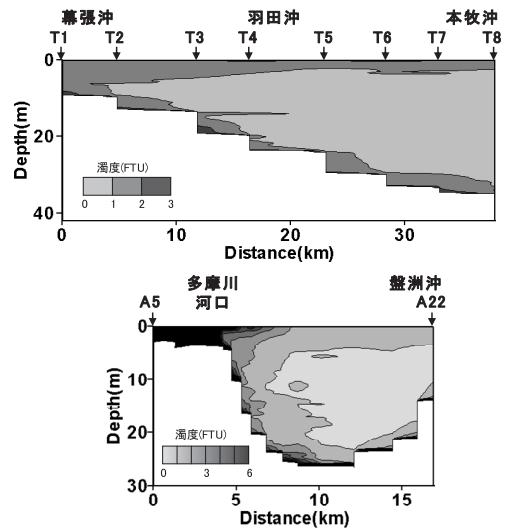


図-2 観測期間平均の濁度の断面分布
(上段：湾軸断面，下段：多摩川河口沖湾横断面)

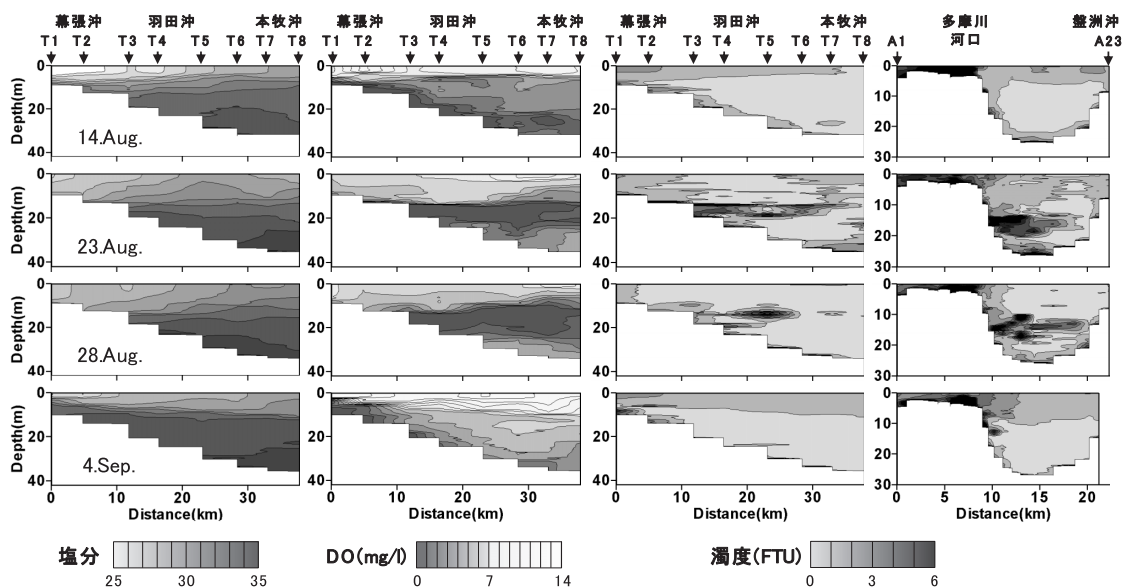


図-3 2007年夏季（8/14～9/4）の塩分，DO，濁度の湾軸断面分布及び濁度の多摩川沖湾横断面分布

塊の空間構造だけでなく、懸濁物質の分布や移動にも影響を与えた事を示唆している。本現象については、中層化した懸濁物質の化学組成など詳細な検討が必要だが、2007年8月上旬に東京湾内湾部のほぼ全域で水色が褐色～茶褐色の濃い赤潮状態（優占種 *Skeletonema costatum*）であったことが報告されていることなどから（千葉県水産総合研究センター, 2007）、植物プランクトン由来のデトリタスが中層貧酸素層内に分解されずに分布したこと、また一部懸濁物質については貧酸素水塊とともに底層から供給されたことなどが形成要因として推測される。

以上の観測結果は、東京湾下層に進入している低温高塩分水の空間構造やその進入特性によって、東京湾内に特徴的な濁度（懸濁物質）の時空間変動が生じることを示唆しているが、懸濁物質と底層水の関係については現地観測結果だけでは明らかでない。そこで次章では、東京湾底層水の動きと懸濁物質の空間構造や移動特性について数値シミュレーションによる基礎的な検討を行った。

3. 数値シミュレーション

(1) 数値シミュレーション概要

数値シミュレーションによる検討は、流動観測データ等が充実している2006年夏季（八木ら, 2007, 2009）及び前章で観測結果を示した2007年夏季の再現計算を通して、底層水の動きと懸濁物質の移動の関係を調べた。用いた数値モデルは、Delft3D-FLOW及びWAQ（それぞれ流動モデルと水質モデル, WL/Delft Hydraulics, 1999）である。流動計算及び水質計算の条件等については、八木ら（2009）、Pokavanichら（2010）に詳しいので参照されたい。なお、本研究では、懸濁物質の移動特性を調べるために、①流動計算結果に基づく中立トレーサの追跡計算、②水質モデルによる非生物体有機物質の時空間変動特性の検討を行った。このうち前者の中立トレーサの追跡計算については、東京湾多摩川河口沖を中心に湾奥方向、湾口方向それぞれ10kmの範囲の底層に（計算モデルの最下層）、10,000個の中立のトレーサ粒子を配置し、それを流動モデルの計算結果に基づいて一定時間追跡した（拡散過程は、ランダムウォークモデルにより拡散係数 $1\text{m}^2/\text{s}$ として評価）。

(2) 数値実験結果

i) 流動特性

はじめに、東京湾内湾域の基本的な流動特性を示すために、多摩川沖の残差流（南北成分, 2006年8～9月）の時空間分布を観測結果（観測点M2：水深25m, 図-1参照）とともに図-4に示す。八木ら（2007, 2008, 2009）が指摘するように同観測点では、残差流に海上風の影響が大きく、南偏風時には中層以深で南向き（湾口向き）、北偏風時には中層以深で北向き（湾奥向き）の流れが発

生する傾向がある。計算結果は多少の差異はあるものの海上風の影響を強く受けた残差流の特徴を概ね再現しており、また水温塩分についても観測結果との良好な対応関係が見られた。このように計算結果の再現性が概ね確認されたことから、次節以降では本流動計算結果に基づいて懸濁物質の移動特性を検討した。

ii) 懸濁物質移動の平面構造

図-5に、2006年8月1日を初期状態として底層に配置した中立粒子の追跡計算を行った結果（8/1, 8/6, 8/12, 8/16の底層のトレーサ濃度の平面分布）を示す。計算結果から、当初湾奥を中心に分布していたトレーサが徐々に湾口側に移動（8/6）、やがて東京湾西岸の多摩川河口沖から東岸側湾奥の千葉港沖方向に延びる筋状のパターンを形成し（8/12）、その後全体的に湾奥側へと移動している（8/16）様子がわかる。図には、底層塩分を併せて表示しているが、トレーサ分布は底層塩分の時空間変動とよく対応しており、トレーサが徐々に底層高塩分水前面部の等塩分線に沿って分布するように変形し、底層高塩分水とともに移動していることがわかる。この期間の海上風を調べると（風速ベクトルを図中に表示）、8/1～8/14の間は一時的な風向変化が見られるものの概ね南偏風が卓越し、8/15～16に比較的強い北偏風へと変化しており、計算結果を示した8/6, 12はそれぞれ南偏風連吹時もしくはその直後の時期、8/16は北偏風時にそれぞれ対応、底層塩分やトレーサの移動状況から、これらが海上風に対応して変動していることが窺える。

図-6に、南偏風直後（8/11）、北偏風時（8/16）の底層残差流ベクトル（25時間平均値）を示す。南偏風直後の底層残差流は、東京湾西岸側で湾口向き東岸側で湾奥向きのシアアを持った分布構造となっており、これによってトレーサは移動、底層塩分の平面分布は変形し、最

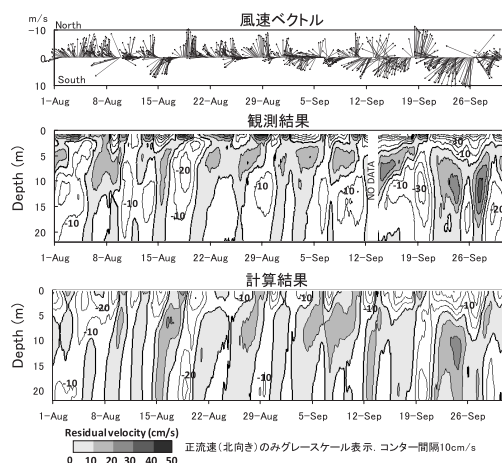


図-4 多摩川河口沖観測点M2における残差流南北成分の時空間コンター（2006年8～9月、観測結果及び計算結果）と風速ベクトル

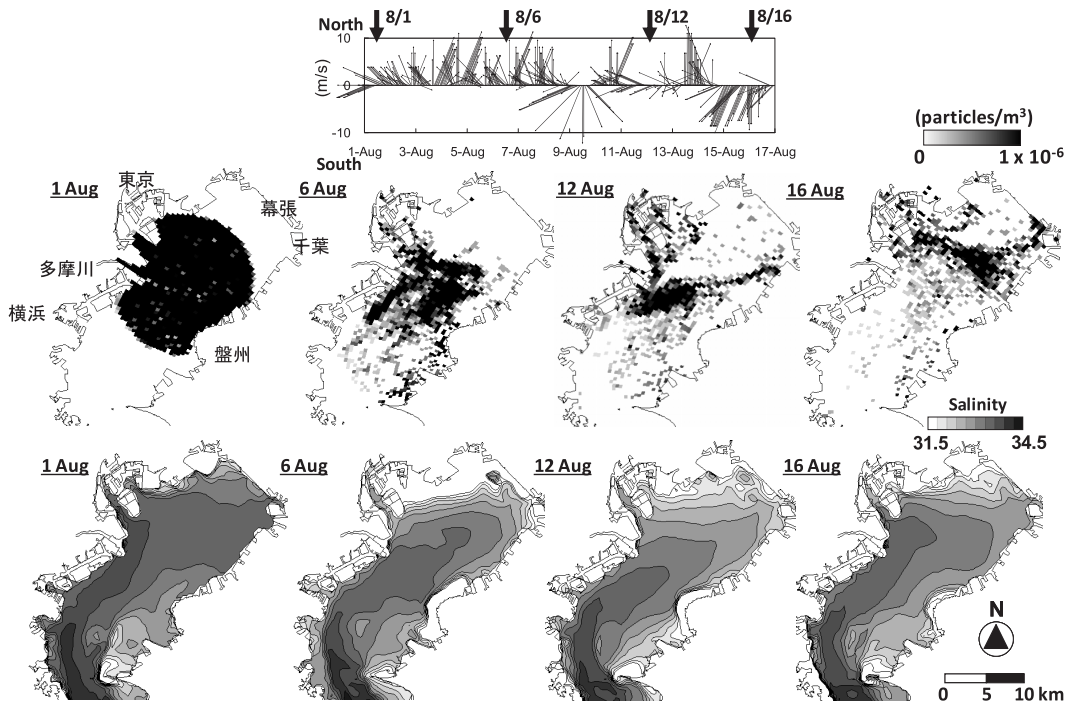


図-5 トレーサー追跡計算結果（2006年8月，上段：底層トレーサー濃度，下段：底層塩分の平面分布，上図は風速ベクトル）

最終的には、底層高塩分水前面部分の等塩分線に沿うように多摩川河口沖から千葉港沖方向に延びる筋状のパターンを形成（8/12），さらに北風時には湾奥向きの残差流が形成されることで全体的に湾奥方向に移動（8/16）したものと考えられる。

以上の計算結果は、懸濁物質が底層高塩分水の前面部に分布し、海上風による底層高塩分水の進入・後退及び変形によって、平面分布パターンが大きく変動する可能性を示しており、夏季には卓越する南風に対応して多摩川沖から千葉港沖方向に延びる筋状分布が形成されやすく、北風時にそれが湾奥方向に移動するパターンを示すことが考えられる。速水ら（2006）は、有明海において懸濁物質が底層高塩分水前縁部に集積することを指摘しているが、吹送流の影響が大きい東京湾湾奥部では海上風が懸濁物質の分布や移動に大きく寄与することを本計算結果は示している。

iii) 懸濁物質移動の断面構造

図-7は、現地調査で中層懸濁層が観測された2007年8/23及びその前日の8/22について、8/20を初期状態としたトレーサー追跡計算結果から湾軸断面分布を示したものである。8/22に底層に沿って分布していたトレーサーが、8/23には観測結果と同様に湾奥域の水深20m程度の地点から上方に浮上しており、外海変動に伴う底層水の進入によって底層付近のトレーサーが上方に移動したことを示している。

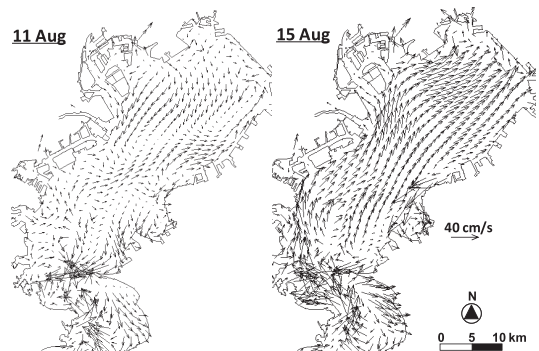


図-6 底層残差流の平面分布（2006年8/11及び8/15）

一方、図-8は、水質計算結果から2006年9/19～9/20の期間の非生物体有機物の湾軸断面分布を示したものである。本期間は、強い南風から北偏風に変化した時期にあたり、強い南風によって底層付近に再懸濁した非生物体有機物（9/19）が海上風が変化する9/20に湾口側を中心に上方に浮上している。図中には、水温の断面分布も併せて表示しているが、海上風の北偏風への変化とともに底層低温水が湾奥方向へ進入、それに伴って非生物体有機物が上方に浮上したことがわかる。

以上の計算結果は、外海変動や海上風変化に伴う底層水進入が東京湾底層の懸濁物質の上層への移動にとって重要な要素となっていることを示している。

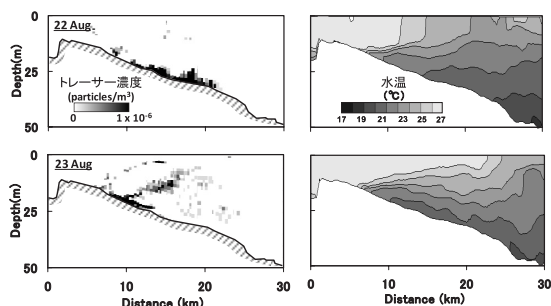


図-7 2007年8月に中層懸濁層が観測された時期のトレーサー追跡計算結果 (トレーサー濃度と水温の湾軸断面分布)

4. まとめ

東京湾における懸濁物質の空間構造と移動特性を現地調査結果と数値シミュレーションの両面から検討し以下の知見を得た。

- (1) 現地調査結果に基づき、東京湾下層の低温高塩分水の先端部付近で相対的に濁度が高くなる場合があり、外海水の底層進入時には貧酸素水塊の中層化に連動して中層に濁度が高い層が形成されることを示した。
- (2) 2006, 2007年夏季を対象とした東京湾の流動及懸濁物質輸送の数値シミュレーション結果から、①懸濁物質 (中立トレーサー) は、東京湾下層の低温高塩分水の前面付近に分布する傾向があり、海上風に対応した底層水の移動や変形によって、夏季に卓越する南偏風連吹時に東京湾西岸 (多摩川河口沖) ~ 東岸 (千葉港沖) に筋状に分布、北風時に湾奥方向に移動する性質がある、②外海変動や海上風変化に伴う底層水進入時には進入水前縁部付近を中心に懸濁物質が底層から浮上し、底層水の進入が懸濁物質の上層への輸送に重要な要素となっている可能性を示した。

謝辞: 東京湾湾口沖の貴重な観測データを神奈川県水産技術センターから提供して頂いたこと、また図の作成にあたり国際気象海洋 (株) 太田友美さんに協力頂いたことをここに記して謝意を表します。

参考文献

- 石渡良志 (1988): 東京湾への陸起源有機物の流入と堆積, 沿岸海洋研究ノート, 第25巻, 第2号, pp. 127-133.
- 鈴木昌弘・小川浩史 (2001): 東京湾における夏季表層水中の有機態炭素・窒素・リンの分布, 沿岸海洋研究, 第38巻, 第2号, pp. 119-129.
- 成田美穂・荒川久幸・下田 徹・森永 勤 (2006): 東京湾における溶存態有機物と懸濁物による濁度の分布および各起因物質との関係, Journal of the Tokyo University of

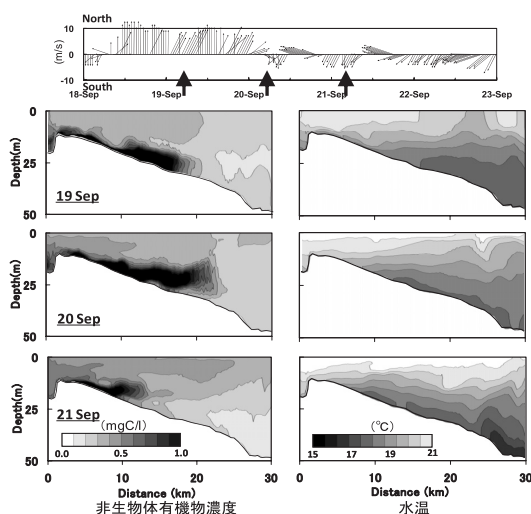


図-8 南偏風から北偏風への変化時における非生物体有機物濃度と水温の湾軸断面分布 (2006年9/19~21の計算結果, 上段は風速ベクトル)

Marine and Technology, No.2, pp. 33-46.

千葉県水産総合研究センター (2007): 貧酸素速報 (8/6), <http://www.pref.chiba.lg.jp/laboratory/fisheries/04jouhou/04tko/04tkodflame.html>.

速水祐一・山本浩一・大串浩一郎・濱田孝治・平川隆一・宮坂仁・大森浩二 (2006): 夏季の有明海奥部における懸濁物質輸送とその水質への影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 956-960.

八木 宏・江連伸明・井瀬 肇・Tanuspong POKAVANICH・灘岡和夫・諸星一信・古土井 健・有路隆一・森重輝政・小林 聡 (2007): 東京湾羽田周辺水域における貧酸素水塊と懸濁物質の時空間変動特性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1036-1040.

八木 宏・Tanuspong POKAVANICH・安井 進・灘岡和夫・有路隆一・松坂省一・鈴木信昭・諸星一信・小田遼子・二瓶泰雄 (2008): 東京湾湾口部の湧昇現象に伴う湾内貧酸素水塊の中層化とその解消過程, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 1081-1085.

八木 宏・Tanuspong POKAVANICH・灘岡和夫・有路隆一・古土井 健・諸星一信・森重輝政・小林 聡 (2009): 東京湾多摩川河口部の流動構造について, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp. 981-985.

Pokavanich, T., Yagi, H., Nadaoka, K., Ogawa, H., Usui, T., Kanda, J., Shimosako, K. and Kimura, S. (2010): Summer quarter hypoxic water characteristics off-Tama river estuary, Tokyo Bay revealed by field and numerical simulation analyses, Proc. Coastal Eng. Conf., in press.

Yanagi, T., Tamaru, H., Ishimaru, T. and Saino, T. (1989): Intermittent outflow of high-turbidity bottom water from Tokyo Bay in summer, La mer, 27, pp. 34-40.

WL|Delft Hydraulics(1999), DELFT 3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.05.