

# 成層期東京湾・多摩川河口沖の流動特性について

Spatial distribution and its temporal variation of residual currents off Tama River estuary  
in Tokyo Bay during stratified season

Tanuspong POKAVANICH<sup>1</sup>・八木宏<sup>2</sup>・出口朋子<sup>3</sup>・灘岡和夫<sup>4</sup>・中川康之<sup>5</sup>  
・有路隆一<sup>6</sup>・松坂省一<sup>7</sup>・鈴木信昭<sup>8</sup>・諸星一信<sup>9</sup>・小田遼子<sup>10</sup>・二瓶泰雄<sup>11</sup>

Tanuspong POKAVANICH, Hiroshi YAGI, Tomoko Deguchi, Kazuo NADAOKA,  
Yasuyuki NAKAGAWA, Ryuichi ARIJI, Shoichi MATSUZAKA, Nobuaki SUZUKI,  
Kazunobu MOROHOSHI, Ryoko ODA and Yasuo NIHEI

The fundamental characteristics of stratified velocity field off Tama River estuary were investigated based on the intensive field surveys coupled with numerical simulation in summer 2007. Measurements results showed that the northward residual currents with peak in the middle layer were induced off Tama River estuary when the stable south wind changed to the north wind. The numerical simulation results suggest that these northward residual currents in the middle layer off Tama River estuary was induced due to the combination of the barotropic wind induced vertical circulation and baroclinic pressure gradient.

## 1. はじめに

東京湾最大の河口干潟を有する多摩川河口域では、現在、東京国際空港再拡張事業が進められており、河口部に建設される大規模構造物が豊かな生態系を有する河口浅場・河口干潟など周辺水域へ与える影響が懸念されている。河口部の大規模構造物による周辺環境への影響は、まずは周辺の流況や波浪場の変化として現れると考えられるため再拡張事業が行われる多摩川河口部周辺の流動構造・波浪特性を詳細に把握しておくことが重要となる。このうち流動特性については、最近の八木ら(2008a)の検討によって、多摩川河口部の流動構造、特に残差流構造は河口沖海域の流れに強く支配され、河口

沖海域の残差流の流向によって河口部の残差流が循環流型や非循環流型に変化することなどが指摘されているが(図-1参照)、そのベースとなる河口沖海域の流動特性自体についてまだ十分に理解が進んでいるとは言えない。

そこで本研究では、貧酸素水塊の発達など環境悪化が顕著となる成層期を対象として、東京湾・多摩川河口沖海域の流動特性の把握を現地観測と数値シミュレーションの両面から試みた。

## 2. 現地観測及び数値シミュレーションの概要

### (1) 現地観測概要

本研究では、成層期の多摩川河口沖海域の流動特性を把握するために、多摩川河口部と千葉県盤洲沖を結ぶ東京湾横断方向に観測線を設け(図-2(a)), 流速・水質の横断面計測を行った。具体的には、観測線上に設定された7カ所の観測点(A13, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 図-2(a))において、ADCP(RD社Workhorse600kHz)、多項目水質計(アレック電子(株)AAQ1183)を用いた流速、塩

- |    |       |  |
|----|-------|--|
| 1  | M.Eng | 東京工業大学大学院博士課程情報理工学研究科情報環境学専攻               |
| 2  | 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理研究室長(株)IHI |
| 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              |
| 5  | 正会員   | 修(工)独法港湾空港技術研究所海洋・水工部沿岸環境研究領域主任研究官         |
| 6  | 正会員   | (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部沿岸環境研究領域研究官             |
| 7  |       | 国土交通省関東地方整備局鹿島港湾・空港整備事務所保全課長               |
| 8  |       | 修(工)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調査課長          |
| 9  | 正会員   | 工修 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長              |
| 10 | 学生会員  | 修(工)東京工業大学大学院博士課程理工学研究科国際開発工学専攻            |
| 11 | 正会員   | 博(工)東京理科大学准教授理工学部土木工学科                     |

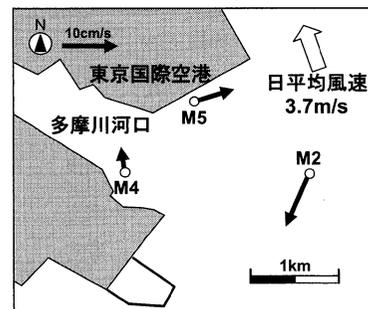


図-1 多摩川河口部の中層残差流(循環流型: 八木ら, 2008a)

分、水温、濁度、蛍光光度、DOの測定を行い、1潮汐間に観測線を6~7回往復することで、1潮汐間の流速・水質の横断面分布を計測した。観測日は夏季~秋季の日潮不等の小さい大潮期とし、2007年8月30日、9月13日の2回実施した。各観測日の潮位と計測のタイミングを図-2(b)に示す。なお、第1回の観測(8/30)は海象条件等の制約から計測往復回数、観測点数が若干少ないため本研究では第2回の横断面計測(9/13)の結果を中心に検討を行った。

さらに本研究では、上記の横断面計測に併せ、羽田沖海域の流動特性を把握するために、同時期に港湾空港技術研究所によって行われた多摩川河口沖の定点連続観測(観測点M2: 図-2(a), 計測項目: 流速・塩分・水温・濁度・蛍光光度・DO等, 観測期間: 2007年8/23~9/20, 詳細は中川ら: 2008参照)の結果も用いて解析を行った。

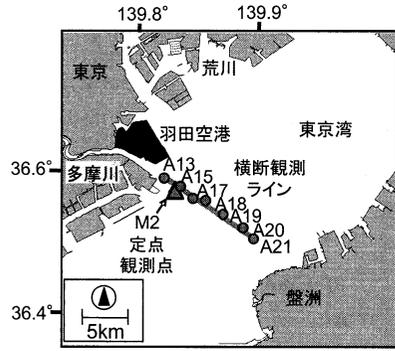
(2) 数値シミュレーション概要

本研究では、現地観測とともに東京湾及び多摩川河口沖の流動特性を把握するために3次元流動モデルDelft3D (Delft Hydraulics,1999)を用いた流況シミュレーションを行った。計算モデルの概要及び計算条件は表-1に示す通りである。ここで、内湾の流動を考える上で重要となる海上風と外海境界条件については、まず前者については、米国国立大気センター(NCAR)等によって開発されたメソ気象モデルWRFを東京湾周辺に適用した計算結果(小田ら, 2008)に基づき時空間的な変化を考慮して与えている。また、外海境界条件については、神奈川県水産技術センターによって毎月1回実施されている東京湾河口沖観測点の水温、塩分鉛直分布をベースとして、湾口部の観測データも考慮した形で与えた(詳細は、八木ら, 2008b参照)。

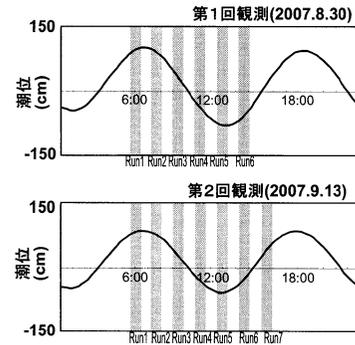
3. 結果と考察

(1) 現地観測

図-3に、第2回観測時(9/13)の湾軸方向流速成分の断面分布を満潮、下げ潮、干潮、上げ潮時について示す。流速は、基本的には下げ潮時に湾口方向、上げ潮時に湾奥方向を示しているが、特徴的な傾向として、西側の多摩川河口沖水深5~10mの範囲(以後、本論文では中層と呼ぶ)で湾奥向きの流れが1潮汐間にわたって生じている。図-4(a)(b)に、本観測結果から算出した残差流(湾軸方向)及び密度の横断面分布示す。ここで残差流は、杉山ら(1995)を参考に1潮汐間に7回行った断面観測結果を重回帰分析により半日周期成分と残差流成分に分離することによって算出した。これを見ると、先に示した流速の傾向(図-3)に対応するように多摩川河口沖中層(密度躍層付近)で湾奥向きの残差流が生じており、東側(盤洲沖側)では逆の湾口向きの残差流構造となっている。



(a)横断観測ラインと定点観測点M2の位置



(b)横断観測時の潮位と計測のタイミング

図-2 現地観測概要

表-1 計算条件

計算期間	2007年6月1日~9月20日
初期条件	水温:25°, 塩分:34.5
格子数&層数	132×44(水平格子数), 25(鉛直層数)
外海境界条件	水位:布良観測値(気象庁) 水温・塩分:湾外観測点(神奈川県水産技術センター,Sta.29)の水温・塩分鉛直分布(月1回)を時間補間。解析対象の夏季は時間解像度を上げるため、湾口部観測点(S4)の観測値(週1回)を参考に外海境界の水温・塩分鉛直分布を補正
陸水流入条件	流量:多摩川,荒川,江戸川,隅田川,鶴見川は毎時の観測値,その他中小河川は流出解析から算出した日平均値,下水量は年平均観測値。 水温:多摩川の観測値を全河川に一律に与える。 塩分:0
気象条件	風向・風速:メソ気象モデルWRF計算結果(水平解像度1km) 気温・雲量・湿度:東京地方気象台&アメダス(羽田)観測値
水平渦動粘性・拡散係数	Smagorinskyモデル
鉛直渦動粘性・拡散係数	k-εモデル
底面摩擦係数	シェージャー係数 150

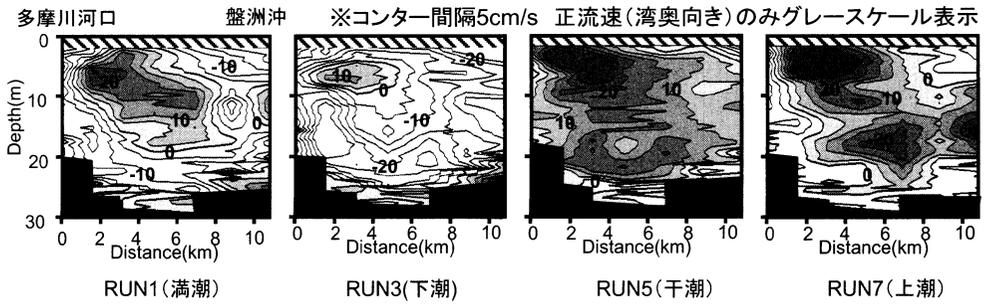
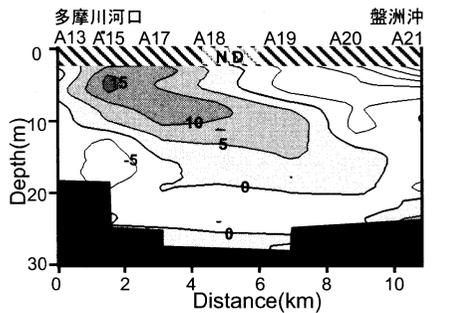
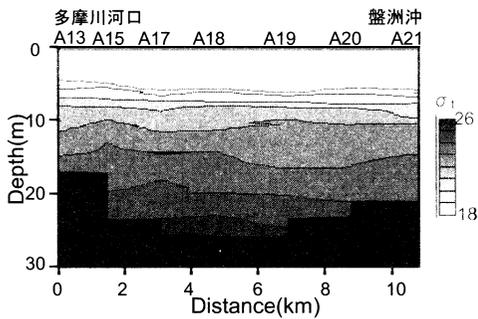


図-3 横断面観測結果(湾軸方向流速の断面分布: 9/13)



※コンター間隔5cm/s 正流速(湾奥向き)にグレースケール表示

(a) 残差流(湾軸方向成分)

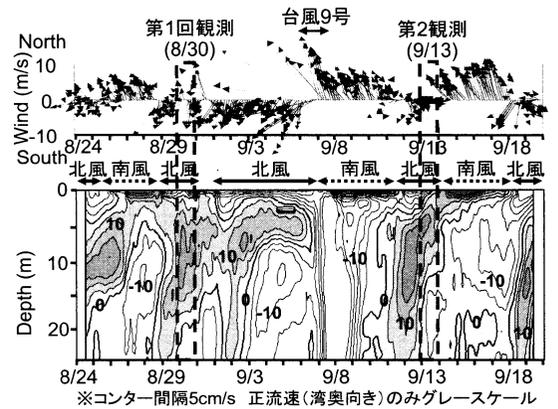


(b)  $\sigma_t$

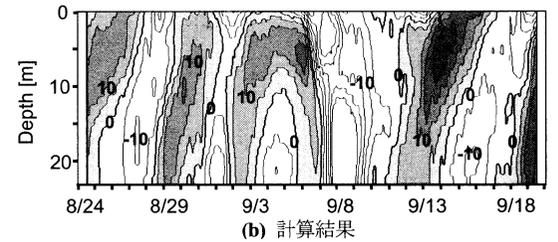
図-4 第2回横断面観測結果から算出した残差流湾軸方向成分と密度の横断面分布

第1回横断面観測(8/30)もほぼ同様の残差流構造を示しており、密度成層強度など多少の差異はあるものの、西側の多摩川河口沖中層(密度躍層付近)を中心に湾奥向きの残差流が発生し、東側では湾口向きとなる残差流構造については2回の断面観測とも同様の傾向が捉えられた。

次に、多摩河口沖の観測点M2における定点観測結果から残差流の特徴を検討した。図-5(a)に、観測点M2における残差流湾軸方向成分の時空間コンターを風速ベクトル(羽田: 気象庁)とともに示す。これを見ると、残差流は海上風と良く対応して変動しており、表層では南風時に湾奥向き、北風時には湾口向きの残差流が発生し、



(a) 観測結果(下)と風速ベクトル(羽田: 上)



(b) 計算結果

図-5 羽田沖観測点M2における残差流湾軸方向成分の時空間コンター(観測結果及び計算結果)と海上風の関係

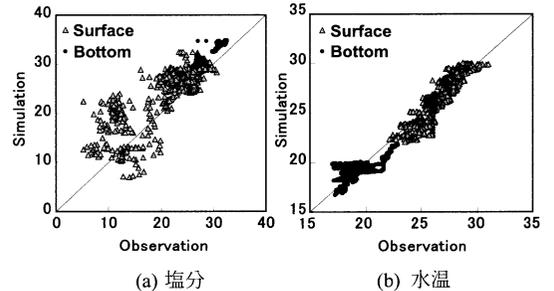


図-6 羽田沖観測点(M2)における表層、底層の塩分と水温の観測結果と計算結果の比較

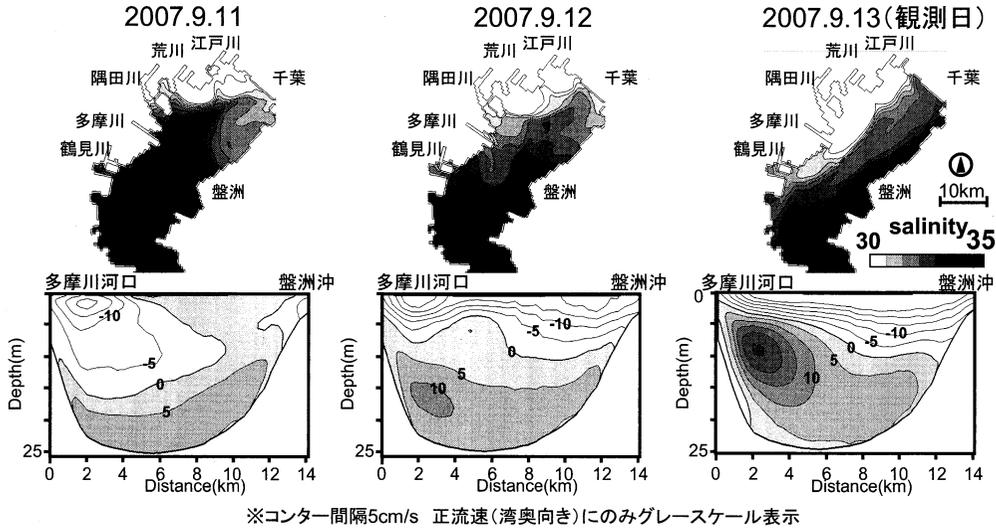


図-7 観測日(9/13)までの表層塩分空間分布(上段)と多摩川河口沖残差流湾軸方向成分の横断面分布(下段)の計算結果

これに対応するように中層以深では表層と概ね逆向きの流速構造が生じている。図中には、先述の2回の横断面観測時を点線枠で表示しているが、これを見ると横断面観測時はいずれも残差流が表層では湾口向き中層以深で湾奥向きとなっている期間にあたり、その中でも中層～下層全体が湾奥向きの状態から残差流のピークが上方に移動し中層で湾奥向き、底層で湾口向きの残差流が生じる時期に対応している。

定点観測点M2は、横断面観測の観測点A15と同位置であり、A15は横断面観測において多摩川沖中層で湾奥向き残差流のピークが生じた位置にはほぼ相当していることから(図-4(a))、定点連続観測と横断面観測の中層湾奥向き残差流は同じものを捉えていると考えられ、多摩川河口沖中層でピークを持つ湾奥向き残差流が生じることが横断面観測及び定点連続観測の両者から確認された。さらに2回の横断面観測時の風系を調べると、いずれも南風連吹後に北風に変化した後の時期にあたり、このことは、多摩川河口沖中層でピークを生じる湾奥向きの残差流は風系の変化(南風から北風)に引き起こされている可能性を示唆している。

(2) 数値シミュレーション

現地観測によって捉えた残差流特性、特に、多摩川河口沖中層にピークを持つ湾奥向き残差流が発生する仕組みを把握するために数値シミュレーションによる検討を行った。図-5(b)には、観測期間の再現計算による多摩川沖観測点M2の残差流湾軸方向成分の時空間コンターを表示している。観測結果と比較すると、多少の差異はあるものの風速に対応して変化する残差流の特徴を概ね捉えている。図-6には、同観測点における表層、底層の塩分・水温を観測値と計算値と比較したものを示す。観

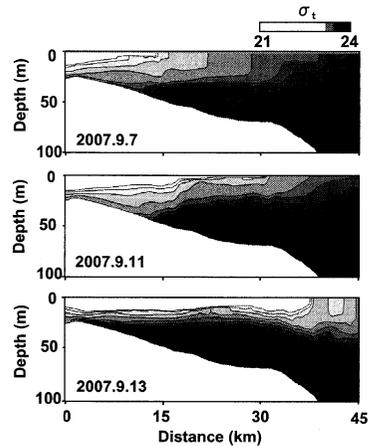


図-8 観測日(9/13)までの密度( $\sigma_t$ )の湾軸断面分布の計算結果

測点が河口部に近いいためか表層塩分には多少不一致があるものの、その他は観測値と概ね対応しており、以上の結果から本シミュレーションの妥当性が確認される。

次に、第2回横断面観測時(9/13)を対象に残差流の特徴を数値シミュレーション結果から検討した。図-7は、横断面観測日前の9/11、12及び観測日の9/13の表層塩分分布、残差流湾軸方向成分の横断面分布(多摩川河口沖～盤洲沖)を示したものである。これを見ると、観測日前(9/11、12)には下層で湾奥向きを示す残差流が観測日9/13にはそのピークが上方に移動し多摩川河口沖中層でピーク(湾奥方向)を持つ構造となっている。このような残差流の横断面分布の特徴や湾奥向き残差流が下層から中層にピークが遷移する傾向は先に示した横断面観測結果や定点観測結果の傾向と一致している。この時の表層塩分を見ると、9/11には湾奥部に分布していた低塩分水が観測日

9/13には東京湾西岸を通過して湾口側へ流出している。本期間は、台風通過後に連吹した強い南風が北風へと変化した時期であり(図-5(a)参照), 南風によって湾奥部に吹き寄せられていた低塩分水が風向の変化によって湾口方向に流出する様子を表していると考えられる。図-8は、密度( $\sigma_t$ )の湾軸断面分布を観測日前の9/9, 11と観測日9/13について示したものであるが、南風連吹によって湾奥部表層に分布していた低密度水が北風への変化によって湾口側に流出、湾口側から高密度水が湾奥部下層に進入しており、横断観測で捉えた多摩川河口沖の残差流構造は、このような海上風の変化による表層水の流出、下層水の流入に伴って発生したものと考えられる。

一般に、成層した水域に風が作用すると、風応力と水面勾配のバランスによる順圧的な吹送流循環が徐々に内部界面(密度躍層)傾斜によって変化し、当初形成される下層(密度界面以下)の戻り流れが中層(密度界面付近)の戻り流れに変化することが知られている(藤原, 1998)。本ケースでも基本的には同様の仕組みが作用したものと考えられ、北風によって当初形成される順圧的な鉛直循環流(下層で湾奥向き)が成層構造の変化によって中層で湾奥向きの流れへと変化したものと考えられる。図-5(a)に示した残差流の観測結果からもわかるように、観測期間中にはこのような海上風の変化に伴う残差流の底層進入から中層進入への変化が度々観測されており、海上風によって湾外系水の進入深度が頻繁に変化していることが示唆される。また、先述のように八木ら(2008a)は、多摩川河口沖の残差流が河口部周辺の残差流構造を支配していることを示しているが、このような河口沖海域の残差流の鉛直構造の変化は河口部周辺の局所的な残差流構造にも影響を与えている可能性が示唆される。

#### 4. まとめ

東京湾・多摩川河口沖海域の流動構造について、現地観測及び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) 多摩川河口沖の東京湾横断面観測結果から、多摩川河口沖中層でピークを持つ湾奥向き残差流の存在を示した。
- (2) 定点観測結果から、多摩川河口沖の残差流が海上風

の影響を強く受けていることを示した上で、横断面観測で捉えた特徴的な残差流構造は、海上風が南風連吹から北風へ変化した際に、湾奥向き残差流のピークが下層から中層にシフトすることで生じていることを示した。

(3) 数値シミュレーション結果から、現地観測で捉えた多摩川河口沖中層でピークを持つ湾奥向き残差流は、南風から北風への風系の変化に伴い、当初形成される順圧的な吹送流循環(下層で湾奥向き)が成層構造の変化によって中層で湾奥向きに変化したものである可能性を示した。

**謝辞:** 現地調査を行う上で協力頂いた『羽田周辺水域環境調査研究委員会』の関係各位、東京湾湾口沖の貴重な観測データを提供して頂いた神奈川県水産技術センター資源情報部樋田史郎氏、また現地調査及び図作成に協力してくれた東京工業大学大学院情報理工学研究科大学院生(当時)、安井 進君、大橋 暁君、松村航裕君、平綿雄一郎君に対してここに記して謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 小田僚子・神田学・森脇亮(2008): 直接測定に基づく東京湾海面温度が都市の気温へ及ぼす影響, 水工学論文集, 第52巻, pp.283-288.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾(1995): ADCPによる伊勢湾の流動構造調査, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1096-1100.
- 中川康之・有路隆一・松坂省一・諸星一信・八木宏・灘岡和夫・田中晋(2008): 東京湾多摩川河口沖における底泥の巻き上げに関する現地観測, 海岸工学論文集, 第55巻(投稿中).
- 藤原建紀(1998): 風が起す流れ・混合・密度流, 沿岸の環境圏(平野敏行監修), フジテクノシステム, pp.32-36.
- 八木 宏・大橋 暁・Tanuspong POKAVANICH・灘岡和夫・諸星一信・鈴木信昭・松坂省一・有路隆一・森重輝政・小林 聡(2008a): 多摩川河口部周辺の流動特性について, 2008年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, p.67.
- 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(2008b): 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(投稿中).
- Delft Hydraulics (1999): DELFT 3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.05.