

東京湾成層期の流動のリアルタイムシミュレーション

田中昌宏*・稲垣 聡**・八木 宏***

1. はじめに

湾内の流動構造を明らかにする一つの有力な手段として、数値シミュレーションが数多く行われるようになってきている。東京湾においても、特に成層期を対象に数値実験が行われ(たとえば、中辻ら(1995)、小林ら(1995)、田中ら(1996))、基本的な流動構造が明らかにされつつある。これらの計算では、因果関係を明確にするため、外力条件として一定の気象・海象条件が用いられてきた。しかし、灘岡ら(1996)は風の時空間特性と湾内の流動の関係を数値実験により検討し、風の評価スケールの取り方によって、残差流や移流混合のシミュレーション結果が大きく異なることを示した。したがって、より詳細に湾内流動の特性やその内部機構を議論するためには、実際の気象・海象条件を時系列的に与える、いわゆるリアルタイムシミュレーション(以下 RTS)が必要と考えられる。多部田・藤野(1994)は、成層期を対象に RTS を実施し、定性的には実測値を再現できることを示したが、定量的には問題を残している。

そこで本研究では、まず森川・村上(1986)の東京湾における流動観測データを対象に RTS を行い、数値モデルの検証を行うと共に、残差流の特性とその形成機構を検討する。さらに中川ら(1997)が実施した ADCP による流動観測データに対しても RTS を実施し、東京湾成層期の流動構造を明らかにすることを目的とする。

2. 数値モデルの概要

数値モデルはオランダ・デルフト水理研究所が開発し、共同で改良を進めている流動モデル TRISULA (Delft Hydraulics (1995)) を用いる。TRISULA は静水圧近似を仮定した準 3 次元モデルで、鉛直方向に σ 座標系を用い、鉛直拡散係数の評価に $k-\epsilon$ モデルを用いている。

図-1 に示すように計算領域は、間口一保田を結ぶ線以北の海域とし、800 m の正方形格子で分割した。鉛直方

向は、一様に 10 層分割とした。水深は JODC の水深データから計算格子点での水深を求めたが、計算の安定性から開境界上では 50 m で一定とし、計算領域内部と滑らかに接続した。

3. 1983 年夏の観測データを対象とした RTS

森川・村上(1986)は 1983 年 8 月下旬から 15 日間～60 日間に渡り、流動観測を図-1 に示す 10 点で実施し、東京湾における長周期流れの変動特性を検討している。ここでは、この観測データを対象に RTS を実施した。

3.1 計算条件

a) 初期条件

初期条件として必要となるのは、水温、塩分であり、ここでは公共用水域水質データから与えることとした。ただし、このデータは月 1 回の観測であり、シミュレーションからすればかなり空間的にも粗いデータであるため、そのままでは使えない。ここでは、検討対象期間に初期条件の影響がなくなる程度までさかのぼって計算を開始することとした。そこで、表層については、湾内の

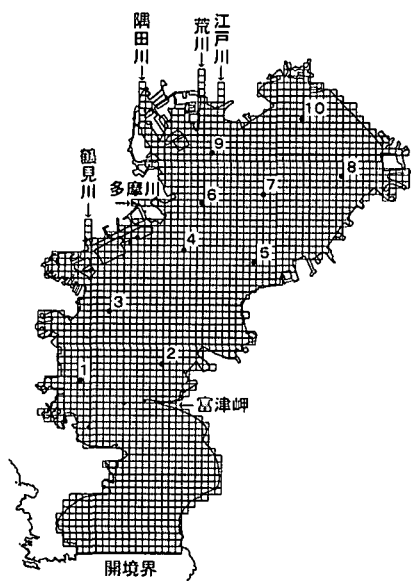


図-1 計算格子 (●森川・村上(1986)の観測点)

* 正会員 工博 鹿島技術研究所 主任研究員

** 正会員 工修 鹿島技術研究所 研究員

*** 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

表一 開境界における潮汐条件

分潮	船形 (房総半島)		間口 (三浦半島)	
	振幅	位相	振幅	位相
O_1	18.4 cm	157.3°	19.7 cm	152.5°
K_1	23.6 cm	177.9°	22.9 cm	175.7°
M_2	36.3 cm	145.9°	37.3 cm	146.1°
S_2	17.4 cm	173.5°	16.8 cm	173.7°

表二 夏季の河口平均量 (環境庁 (1989))

河川名	流量 (m^3/s)	水温 ($^{\circ}C$)	塩分
江戸川	122.3	26.5	5.0
荒川	190.6	26.5	5.0
隅田川	57.4	26.3	5.0
多摩川	27.5	26.6	5.0
鶴見川	10.1	27.0	5.0

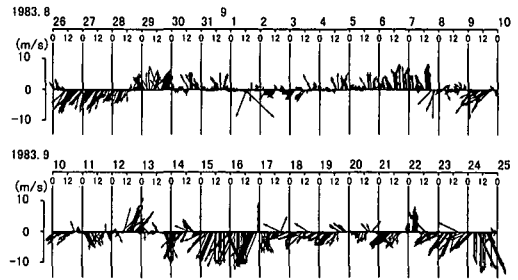
表三 1983 年夏を対象とした RTS の計算条件

	Run 1	Run 2
計算期間	1983 年 8 月 11 日～9 月 9 日	1983 年 9 月 10 日～9 月 24 日
検討対象期間	8 月 26 日～9 月 9 日	9 月 10 日～9 月 24 日
初期条件	水温 表層 25.8 $^{\circ}C$ 底層 18.9 $^{\circ}C$	Run 1 の結果
塩分	表層 27.64 底層 33.79	同上
流量	流量年表 (日変化)	同左
河口条件	水温 公共用水域データ (日変化)	同左
塩分	5.0 一定	同左
開境界条件	潮汐 主要 4 分潮 (M_2, S_2, K_1, O_1)	同左
水温	8/1 表層 24.5 $^{\circ}C$ 底層 19.18 $^{\circ}C$ 9/5 表層 27.9 $^{\circ}C$ 底層 18.13 $^{\circ}C$	9/5 表層 27.9 $^{\circ}C$ 底層 18.13 $^{\circ}C$ 10/4 表層 22.6 $^{\circ}C$ 底層 21.13 $^{\circ}C$
塩分	8/1 表層 33.095 底層 34.446 9/5 表層 32.646 底層 34.458	9/5 表層 32.646 底層 34.458 10/5 表層 32.184 底層 34.200
風	第二海堡 (時間変化)	同左
気象条件 日射・気温・ 湿度・雲量	東京気象台 (日変化)	同左

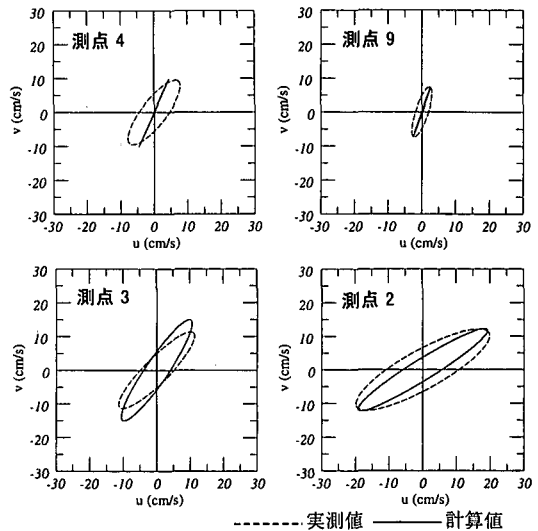
代表的な数点を選んで 1983 年 8 月 1 日測定の日データを平均して与えた。底層については観測値の最低値を与えた。これは、夏の場合受熱期にあり初期条件で与えた水温より計算中その値を下回る状況はないと考えられるからである。鉛直分布は表層、底層の値から線形に与えた。なお、事前の検討計算から、東京湾の場合、15 日程度の計算で初期条件の影響がなくなることを確かめている。

b) 境界条件

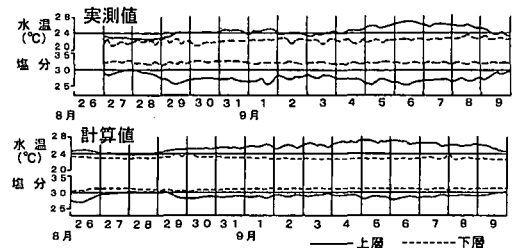
境界条件で特に重要になるのは、太平洋に面する開境界条件と河口条件である。まず、開境界の潮位は、表一に示すように三浦半島、房総半島それぞれの開境界に近い検潮所の主要 4 分潮を与えた。水温、塩分の条件は公共用水域水質データの対象期間に近いデータから、時間的にも、鉛直方向にも線形補間で与えた。河川流量は図一に示す主要 5 河川で与えた。主要 5 河川の内隅田川以外はすべて流量年表にデータがある。しかし、流量観測点は河口からかなり上流にあるため、その間の流量変化を補正する必要がある。表二は環境庁 (1989) が調査した 1984 年～86 年の 7 月から 9 月の各河川の河口の平均流量である。そこで、この期間の各河川の最下流観測点での流量年表データを用いて補正係数を算出した。しか



図二 検討対象期間の風 (第二海堡)



図三 潮流楕円



図四 水温、塩分の時系列 (測点 5)

し、荒川は最下流の観測点が河口から約 70 km とかなり上流にあり、相関も悪かったため、表二の値を一定に与えることとした。隅田川も表二の値を一定に与えることとした。なお、江戸川放水路は洪水時のみ放水されるが、ここではすべて江戸川から放流することとした。

気象条件は東京気象台のデータを日変化で与え、風は第二海堡のデータを時間ごとに与えた (図二参照)。

c) 計算ケース

計算は観測期間の前半 (1983 年 8 月 26 日～9 月 9 日) と後半 (9 月 10 日～9 月 24 日) に分けて行った。前半の Run 1 では上記の初期条件を用いて 8 月 11 日から計算

し、後半の Run2 は Run1 の最後の結果を初期条件として計算した。計算条件を表-3 にまとめた。

3.2 結果及び考察

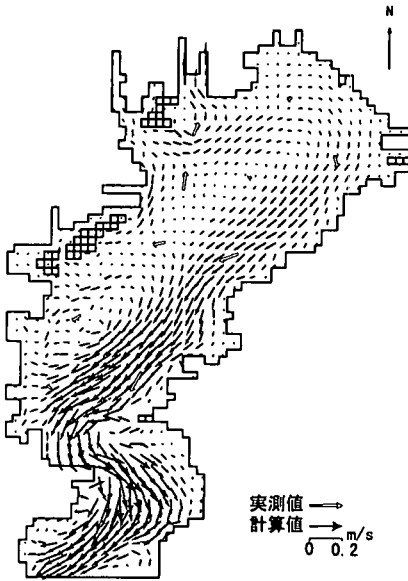
a) 潮流 楕円

Run1 の対象期間の計算結果から M_2 分潮の潮流楕円を解析し、代表的な 4 点について実測値と共に図-3 に示す。計算値は実測値と非常に良く一致している。

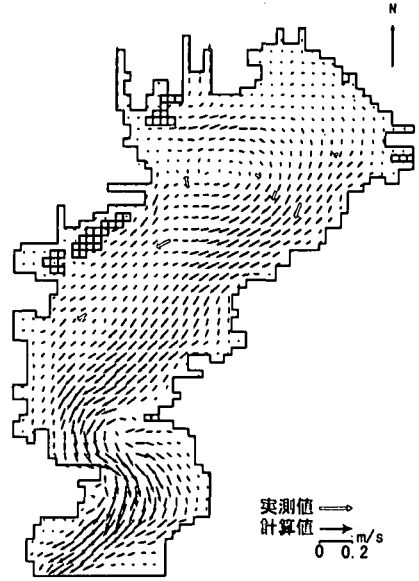
b) 水温・塩分

図-4 は前半の観測期間 (1983 年 8 月 26 日～9 月 9 日) の湾の中央部における測点 5 の水温、塩分の時系列を計算値と共に示す。計算値と実測値は良く一致している。その他の点についても比較したが、湾奥、及び湾口に近いほど実測値との絶対値の差は多少大きくなった。これは境界条件の影響と考えられるが、全体的にも計算値は実測値と非常に良く一致していると言える。

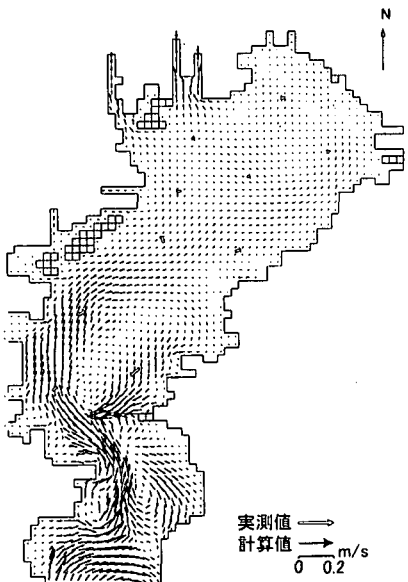
c) 残差流



(a) 表層 (水面下 3 m)

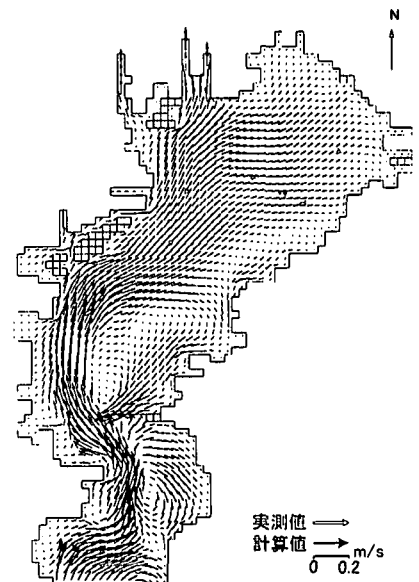


(a) 表層 (水面下 3 m)



(b) 底層

図-5 Run1 の残差流



(b) 底層

図-6 Run2 の残差流

図-5(a) に水面下3mの残差流ベクトルの計算値を実測値と共に示す。本モデルは σ 座標を用いているため、計算値のベクトルは水面下3mの平面に内挿して求めたものである。図-5(b)には底層の分布を示す。底層の観測値は、平均的に計算の第8層に対応するため、そこでの値を示している。

まず計算結果と実測値は良く一致していると言える。湾奥の上層には良く知られた時計回りの還流がみられ、これは藤原ら(1994)が明らかにした高気圧性の渦と考えられる。この還流はエスチャリー循環によって形成されるが、この期間では表層水の外洋へ流出は、東岸に沿って生じている。東京湾の南下流は、西岸に沿うことが宇野木(1985)によって指摘されており、田中ら(1996)の計算やGuo and Yanagi(1996)の診断モデルによる検討からも再現されている。しかし、この西岸に沿う南下流は、主要河川からの淡水流量が多く、河川ブリュームが明確な時に形成されるものと考えられる。したがって、東京湾の南下流はむしろ、通常は東岸に添う方が卓越しているものと考えられる。

図-6は観測期間後半のRun2の結果を図-5と同様に示す。こちらも計算結果は実測値を良く再現している。この期間は、前半に比べ北寄りの風が卓越してきている(図-2参照)。このため、表層の流体はエックマン輸送により西側に運ばれ、南下流の東岸への集中度が薄れている。一方、底層の北上流は、Run1に比べかなり強くなっており、これも風による鉛直循環と考えられる。

Run2も湾奥では表層の時計回りの還流が依然存在している。この時計回りの還流の駆動力は、前半では河川からの淡水の流入によるエスチャリー循環と考えられ、後半は北寄りの風がさらにそれを強める働きをしているものと考えられる。一方通常夏は南風が卓越することから、夏を対象とした流動計算では、南風を一定に与えた計算が多い。この場合、湾奥の時計回りの還流は認められない(中辻ら(1995)、田中ら(1996))。そこで、この計算でも風が南風が卓越している場合に、残差流がどのようなかを見てみる。図-7はRun1の期間で南風が卓越していた9月6日12時から7日12時の期間(図-2参照)を平均して得られた表層の残差流ベクトルである。湾奥の還流は消え、表層は全体に北流となっている。また富津岬の北側には、時計回りの還流が見られる。この富津岬近くの還流は、潮汐残差流によって形成されることが知られており、この場合それが南風によって強められたと考えられる。

このように、東京湾の残差流は、淡水の流入量と風向きによって変化し、エスチャリー循環と北寄りの風が卓越する場合には、湾奥に時計回りの還流が形成されるものと考えられる。また、エスチャリー循環による表層の

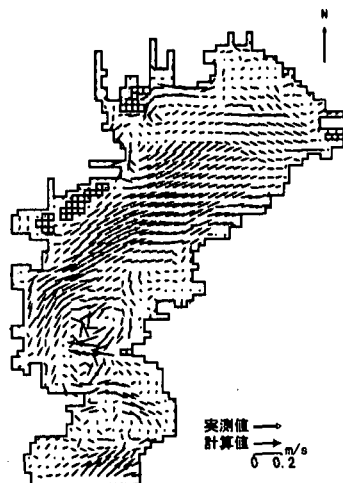


図-7 南風卓越時の残差流(水面下3m)

南下流は、平常時の流入流量の場合、東岸に沿う傾向が強い。一方南風が卓越する場合には、湾奥の還流は消え、富津岬北の時計回りの還流が強められると考えられる。

4. 1996年9月13日を対象としたRTS

4.1 観測データ(中川ら(1997))

この観測は成層期である1996年9月13日の6時から18時にかけて、湾奥ライン(浦安沖～市原沖)と湾中央ライン(川崎沖～木更津沖)の2つのラインを設け、これらのライン上を船で7往復することによって、流速をADCPで、水温、塩分はSTDで測定したものである。

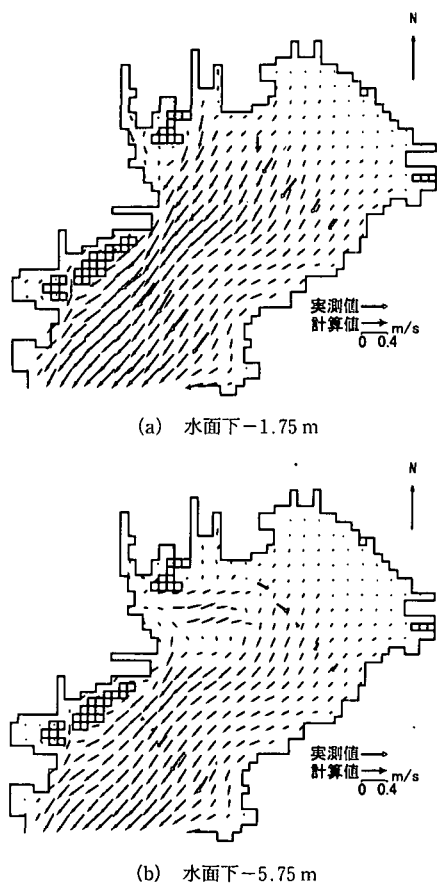
4.2 計算条件

計算条件の与え方は、3章と同様であるが、流量年表及び公共用水域水質データはまだ公表されていない。そこで、流量は表-2に示した一定値を与え、水温、塩分の条件は千葉県水産試験所富津分場の観測データから決定した。計算条件を表-4に示す。

表-4 1996年9月13日を対象としたRTSの計算条件

計算期間		1996年8月30日～9月13日	
検討対象期間		1996年9月13日6:00-18:00	
初期条件	水温	表層 25.6°C	底層 19.0°C
	塩分	表層 30.76	底層 33.54
河口条件 (主要5河川)	流量	各河川一定	
	水温	各河川一定	
	塩分	5.0一定	
開境界条件	潮汐	主要4分潮 (M_2, S_2, K_1, O_1)	
	水温	表層 24.7°C	底層 21.1°C
	塩分	一定	
風条件		第二海堡(時間変化)	
気象条件		東京気象台(日変化)	
日射・気温・湿度・曇量		東京気象台(日変化)	

*水質、塩分は千葉県水産試験所富津分場測定データより



図—8 1996年9月13日8:00の流速ベクトル

4.3 結果及び考察

図—8に1996年9月13日の8時から9時にかけて観測された観測データの表層(−1.75 m)と中層(−5.75 m)の流速ベクトルを、計算の8時の時点のベクトルと共に示す。この時間帯は干潮の約2時間前の下げ潮時となっている。またこの日を含め数日前から北寄りの風が強く、計算結果も実測値も表層は全体に南下流が強くなっている。一方、中層をみると観測値は湾奥に明らかな還流が推察できる。計算も荒川、江戸川の前面で北東の流れが見られ、その東岸よりでは南下流となっているため、還流的と見ることもできる。しかし、下げ潮時にもかかわらず北流している中層の領域は、河口の前面であることから、河口フロント下層の逆流域になっているものと考えられる。

3章の考察から、北寄りの風のときには湾奥の時計回りの還流は強められることから、この日もこの還流が存在しているのは明らかであるが、下げ潮時にもかなり強い北流が存在できる理由は、この河口フロントより下層の逆流があるからではないかと考えられる。

以上から、湾奥の時計回りの還流は、基本的にはエス

チャリー循環と北寄りの風による鉛直循環による湾奥の上昇流が高気圧性の渦を形成したものと考えられるが、それに加えて、河口フロント下層の逆流がその還流を強める働きを持っているものと考えられる。

5. おわりに

東京湾成層期を対象にRTSを実施し、本モデルが実際の流動を高精度に再現できることを確かめると共に、残差流の特性とその形成機構について検討を加えた。

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 湾奥の残差流の基本は、エスチャリー循環あるいは北寄りの風による鉛直循環に伴う湾奥の上昇流が形成する高気圧性の渦による時計回りの還流である。
- 2) この還流は湾奥の河口フロントの存在によってさらに強められている。
- 3) 湾奥の還流は、南風による北流がエスチャリー循環による南流よりも強い場合には、消滅する。
- 4) 表層の南下流は平常時は東岸で強い。

謝辞：1996年の計算に際し、千葉県水産試験所富津分場より水温・塩分等の観測データを提供して頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 宇野木早苗(1985)：第9章東京湾II物理，日本全国沿岸海洋誌，pp. 334-361。
- 環境庁(1989)：東京湾水質予測モデル検討確立調査，昭和63年度環境庁委託業務結果報告書。
- 小林卓也・三村信男・塚田光博(1995)：三次元潮流シミュレーションによる東京湾の海水混合の解析，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1071-1075。
- 田中昌宏・G. S. Stelling and A. Markus(1996)：東京湾の残差流のシミュレーションとそれが水質解析に及ぼす影響について，海岸工学論文集，第43巻，pp. 1121-1125。
- 多部田 茂・藤野正隆(1994)：東京湾の恒流と密度場の変動に関する数値実験，海岸工学論文集，第41巻，pp. 306-310。
- 中川康之・八木 宏・鯉淵幸生・日向博文・稲垣 聡・小倉久子(1997)：東京湾内湾部における成層期の流動特性に関する現地観測，海岸工学論文集，第44巻，印刷中。
- 中辻啓二・尹 鍾星・白井正興・村岡浩爾(1995)：東京湾における残差流系に関する数値実験，海岸工学論文集，pp. 391-395。
- 澤岡和夫・八木 宏・日向博文・二瓶泰雄・栗原 礼(1996)：閉鎖性水域内流動特性に及ぼす外力の時間変動性の効果，海岸工学論文集，pp. 391-395。
- 藤原建紀・澤田好史・中辻啓二・倉本茂樹(1994)：大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性，沿岸海洋研究ノート，第31巻，pp. 227-238。
- 森川雅行・村上和男(1986)：東京湾における長周期流れの変動特性，港湾技研資料 No. 550，50 p。
- Guo, X and T. Yanagi(1996)：Seasonal variation of residual current in Tokyo Bay, Japan, J. Oceanography, Vol. 52, pp. 597-616。
- Delft Hydraulics(1995)：TRISULA, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 2.45, Delft Hydraulics。