

CIP-FEMを用いた準3次元内湾流動モデルによる東京湾の循環流に関する基礎研究

A QUASI-3D NUMERICAL SIMULATION FOR HYDRODYNAMIC CIRCULATION IN TOKYO BAY USING CIP-FEM

東 博紀¹・牧 秀明²
Hironori HIGASHI and Hideaki MAKI

¹正会員 工博 独立行政法人国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

²非会員 工博 独立行政法人国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

We developed a numerical quasi-3D hydrodynamic model using CIP-FEM to evaluate the enclosed coastal environments. The model was applied to Tokyo Bay to investigate its performance and usefulness. The calculated profiles of salinity and water temperature agree well with the observed ones. These results show that the validity of the proposed model was confirmed, and the improvements of the solving method for the advection term made progress toward the accuracy of the vertical profiles in the surface layer. We discussed a relationship between wind conditions and clockwise/counterclockwise circulation in the upper and middle layer using the proposed model.

Key Words : numerical simulation , CIP, FEM, clockwise/counterclockwise circulation, Tokyo Bay

1. 研究目的

閉鎖性海域における健全な水環境・生態系を保全・形成するためには、水質汚濁や富栄養化現象の発生メカニズムを解明し、流域の都市化や気候変動など将来に起こりうる人為的・外的作用が水質・水生生物に及ぼす影響を予測するとともに、水質改善技術の導入や水質環境基準の設定などの対策を的確に行うことが重要である。

東京湾は我が国の代表的な閉鎖性水域であり、総量規制によって汚濁負荷量は減少したが、現在でも毎年のように赤潮・貧酸素水塊が発生している。陸域から流入した汚濁負荷物質の移流や拡散、及びそれに伴う生態系への影響を検討するためには湾内の平均流や温度・塩分成層の形成といった水域特有の流動特性を明らかにする必要がある。東京湾の流動は、河川からの多量の淡水流入、湾口での潮汐、海面での熱交換、風・海底による摩擦・鉛直混合など様々な外的要因を受けて時・空間的に大きく変動している。東京湾の流動特性の解明を目的とした研究はこれまでも多数行われており、数値シミュレーションによる検討も活発に進められている。例えば、中辻ら¹⁾は3次元数値シミュレーションによって東京湾の残差流の発生とその外的要因を検討している。渡辺ら²⁾はBlumberg and Goodrichモデルをベースとした3次元流動モデルを開発し、秋季の風による成層の破壊と貧酸素水塊の発生の関係を論じている。

近年、計算機器の性能の向上に伴い数値解析技術が著しく発展し、移流現象や鉛直混合などを高精度に解析するためのスキームが多数提案されている。中でも

矢部ら³⁾が開発したセミ・ラグランジュの移流スキームCIP(Cubic-Interpolated Pseudo-particle)法は多くの数値モデルに応用され、その有用性が認められている。内湾の流動モデルにおいてもCIP法の導入が試みられている⁴⁾が、中山ら^{5),6)}のように高精度スキームを導入した数値モデルを用いて東京湾の流動特性を研究した研究はまだまだ多くない。

本研究では、富栄養化現象の発生メカニズム解明の基礎となる、東京湾の流動特性を良好に再現ができ、中・長期的な水質・生態系評価・予測に実用的な数値モデルの開発を目指して、CIP法と有限要素法(FEM)を組み合わせた σ 座標系の準3次元流動・水質・生態系モデルを構築する。本モデルを東京湾に適用して水温・塩分濃度の観測値の再現精度を検証するとともに、湾奥における時計回り・反時計回りの循環流について数値シミュレーションに基づく検討を行う。

2. 流動モデルの概要

(1) 基礎式

流動の支配方程式には静水圧近似及びブシネスク近似を適用した式(1)~(4)、塩分、熱及び物質の輸送には移流拡散方程式(5)~(6)を用いた。なお、本モデルでは鉛直方向に σ 座標系(水面で $\sigma = 1$ 、海底で $\sigma = -1$)を導入し、水平方向と鉛直方向を分離して解くことにより準3次元計算を行っている。

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} + \frac{\partial (\omega D)}{\partial \sigma} = S_D \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial \sigma}$$

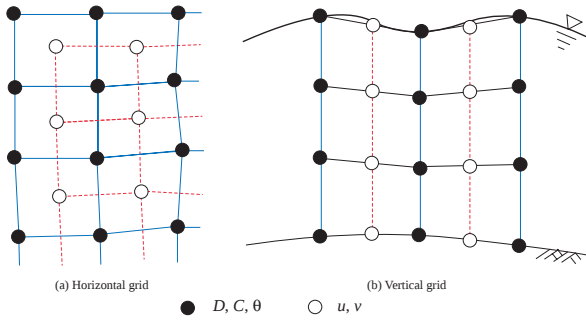


図-1 計算格子と変数の配置

$$= -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \gamma_x \frac{\partial P}{\partial \sigma} \right) + F_u + f_v \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial \sigma} \\ &= -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial P}{\partial y} + \gamma_y \frac{\partial P}{\partial \sigma} \right) + F_v - f_u \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{2}{D} \frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho(D, C, \theta) g \quad (4)$$

$$\frac{\partial DC}{\partial t} + \frac{\partial u DC}{\partial x} + \frac{\partial v DC}{\partial y} + \frac{\partial \omega DC}{\partial \sigma} = F_C + S_C \quad (5)$$

$$\frac{\partial D\theta}{\partial t} + \frac{\partial u D\theta}{\partial x} + \frac{\partial v D\theta}{\partial y} + \frac{\partial \omega D\theta}{\partial \sigma} = F_\theta + S_\theta \quad (6)$$

ここに、 D :水深、 u, v, ω :それぞれ x, y, σ 方向の流速、 P :圧力、 C :塩分濃度、 θ :ポテンシャル水温、 f :コリオリ係数、 ρ_0 :海水の平均密度、 g :重力加速度、 F :渦粘性渦拡散項、 S :ソース項、 γ_x, γ_y :座標変換によって生じる項である。 ρ は海水の密度であり、UNESCOの状態方程式⁷⁾より算定される。

(2) 数値解法

本モデルでは図-1に示すように水平方向は重構造の四角形要素で、鉛直方向は線要素で計算領域を分割し、水平方向の移流項の計算にはCIP法を、他の項にはFEMを用いて計算を行う。そのためにまず式(1)、(5)及び(6)を式(7)～(9)のように3段階に分離する。

$$\frac{D\phi^* - D\phi^n}{\Delta t} + u^n \frac{\partial D\phi^n}{\partial x} + v^n \frac{\partial D\phi^n}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\phi^{**} - D\phi^*}{\Delta t} &= -D\phi^* \frac{\partial u^{**}}{\partial x} - D\phi^* \frac{\partial v^{**}}{\partial y} \\ &\quad - \frac{\partial \omega^{n+1} D\phi^*}{\partial \sigma} + S_\phi \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{D\phi^{n+1} - D\phi^{**}}{\Delta t} = F_\phi \quad (9)$$

ここに、 ϕ :式(1)では1、式(5)では C 、式(6)では θ に相当する。

式(2)、式(3)についても式(10)～(12)及び式(13)～(15)のようにそれぞれ3段階に分離する。

$$\frac{u^* - u^n}{\Delta t} + u^n \frac{\partial u^n}{\partial x} + v^n \frac{\partial u^n}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

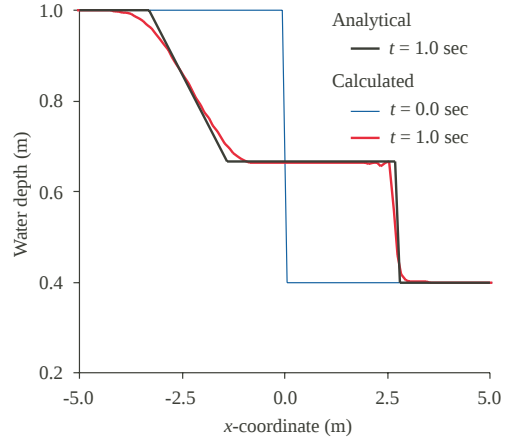


図-2 段波の解析結果

$$\frac{u^{**} - u^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \gamma_x \frac{\partial P}{\partial \sigma} \right)^{**} - \omega^{n+1} \frac{\partial u^*}{\partial \sigma} \quad (11)$$

$$\frac{u^{n+1} - u^{**}}{\Delta t} = F_u + f v^{**} \quad (12)$$

$$\frac{v^* - v^n}{\Delta t} + u^n \frac{\partial v^n}{\partial x} + v^n \frac{\partial v^n}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{v^{**} - v^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial P}{\partial y} + \gamma_y \frac{\partial P}{\partial \sigma} \right)^{**} - \omega^{n+1} \frac{\partial v^*}{\partial \sigma} \quad (14)$$

$$\frac{v^{n+1} - v^{**}}{\Delta t} = F_v - f u^{**} \quad (15)$$

計算手順は、まず各層における式(7)、(10)及び(13)の移流項を棚橋⁸⁾の3次補間関数を用いてCIP法で計算する。次に式(8)、(11)及び(14)を用いて流速と圧力の収束計算を行い、最後に残りの式をFEMで計算する。 ω は各層で算定された水深 D より算定される。なお、CIP法では各格子点において計算対象とする物理量の空間微係数が必要であるが、それについては基礎式を x, y 方向で微分した方程式を解いて求めている。

(3) 計算精度の検証

移流現象について本モデルの計算精度を検証するために、式(7)、(8)、(10)、(11)、(13)、(14)を用いて段波の解析を行った。解析条件は x 方向10m、 y 方向1mの矩形水路とし、それぞれ分割幅0.1、0.2mで、鉛直方向は線要素数20で均等に分割した。

図-2に初期水位($t=0.0$ sec)、1.0秒後の解析解及び計算値の水面形を示す。解析解と比較すると、先端の位置や段波到達後の水位など計算値は現象をうまく再現しており、本計算手法の有効性が確認できる。なお、段波の先端部では若干の解の振動が見られるが、これは時間ステップが進むにつれて小さくなるため、長期間の計算では問題とはならない。

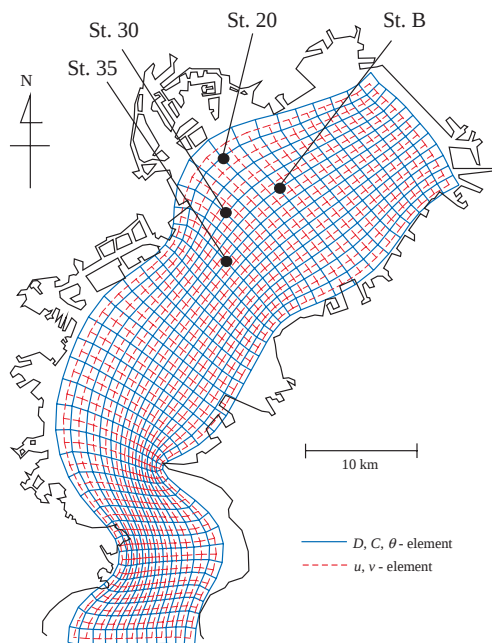


図-3 東京湾の要素分割

3. 東京湾の流動シミュレーションと循環流の考察

(1) 解析の領域と条件

計算領域である東京湾を水平方向については図-3のように、鉛直方向は21層(要素数20, 節点数21)で分割した。鉛直渦動粘性・渦拡散係数の算定には、海面から海底までの乱流スケールを統一的に取り扱える Mellor⁹⁾のモデルを採用した。海面の運動量・熱・水蒸気フラックスは、気象研究所の海洋モデル(MRI.COM)¹⁰⁾でも使用されている Kondo¹¹⁾のモデルを用いて算定した。ただし、海面アルベドの値については、MRI.COMでは0.1としているが、本モデルでは0.06を用いた。風速については千葉の、気温、湿度、降水量については東京、横浜、千葉、館山の気象台・測候所における観測値(気象庁提供)の平均値を用いた。湾口における潮汐・水温・塩分濃度や河川からの淡水流入など他の境界条件及び初期条件については東・木幡¹²⁾と同様の方法で与えた。解析対象期間は1991年と2003年の4~12月とした。

(2) 水温・塩分濃度の観測値と計算値の比較

図-4にSt.Bにおける1991年4月1日~12月31日の計算条件として与えた(a) 主要河川(鶴見川, 多摩川, 隅田川, 荒川, 中川, 江戸川)からの流入量, 表層(0m)及び深さ5, 10mにおける(b) 水温, (c) 塩分濃度の計算値と観測値¹³⁾の比較を示す。まず水温を見ると, 全体的に計算値は観測値とよく一致し, 夏季から秋季にかけての温度勾配の逆転など季節変動をうまく再現している。塩分濃度についても, 表層の塩分濃度が観測値よりもやや低めに算定される傾向にあるが, 計算値は観測値とよく一致している。

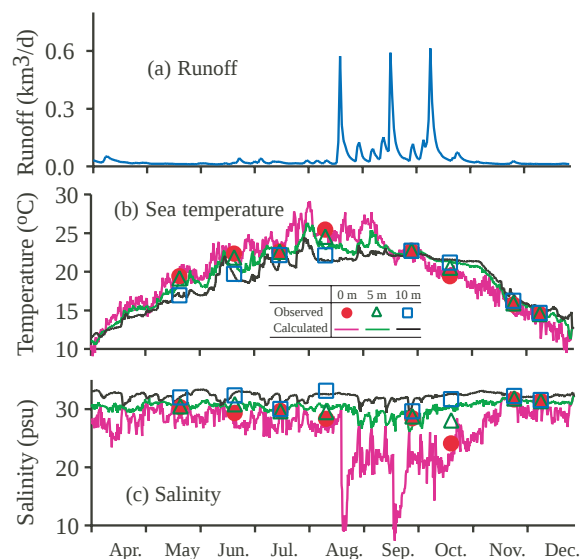


図-4 1991年4~12月の計算値と観測値の比較 (St.B)

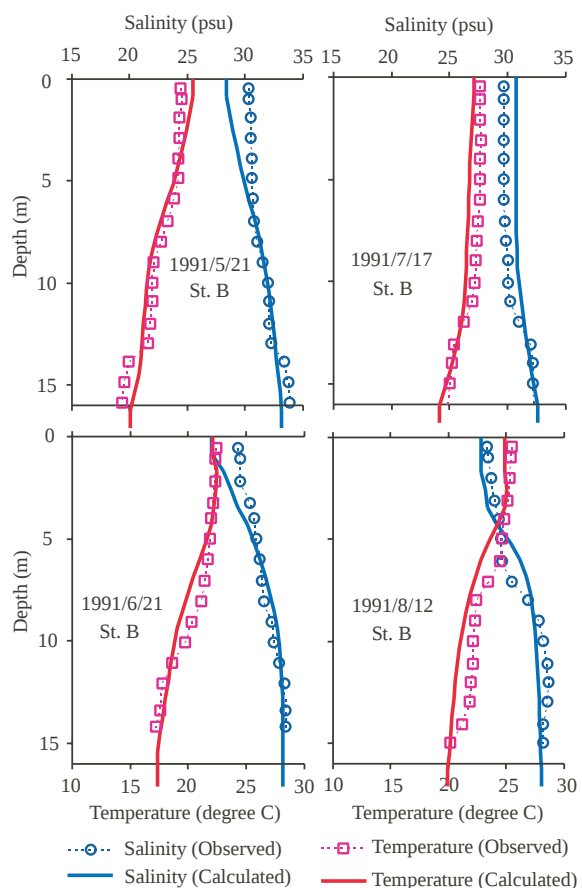


図-5 1991年 St.Bにおける水温・塩分濃度の鉛直分布

図-5にSt.Bにおける1991年5月21日, 7月17日, 8月12日の水温及び塩分濃度の計算値と観測値¹³⁾の鉛直分布の比較を示す。図-5の1991年の水温・塩分濃度の計算値を見ると, 水面近傍で塩分濃度が最大で3psuほどの誤差が生じているが, それを除けば全体的に観測値をうまく再現しており, 本モデルの有用性が認められる。

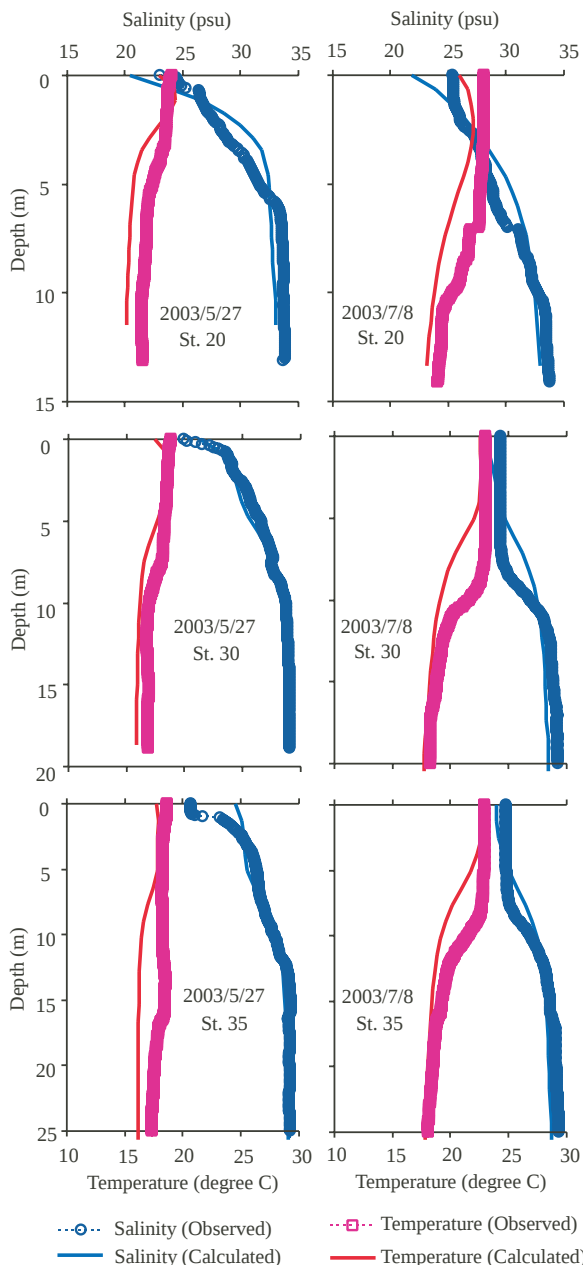


図-6 2003年5月27日、7月8日の水温・塩分濃度の鉛直分布

図-6に2003年5月27日及び7月8日におけるSt.20, 30, 35の水温・塩分濃度の計算値と東京都と共同で実施した調査結果の比較を示す。2003年5月27日の結果では、St.20, 30, 35いずれの地点においても水温の計算値は深いところで観測値よりも低い傾向にあるが、塩分濃度の計算値は観測値とよく一致している。しかし、2003年7月8日の計算値を見ると、いずれの地点においても深さ5~10mの水温・塩分濃度は観測値との差が大きい。2003年7月8日は、その前日夕方から強い北北西~北西風が吹いているが、それによる鉛直混合が計算では過小評価されたためと考えられる。図-5の1991年8月12日の解析結果にもその傾向は見られ、計算値では表層から4m程度まで混合層が発達しているが、観測値では計算値を上回る7mまで混合層が形成されてい

る。これについては、Mellorの鉛直混合スキームの限界とも考えられるが、それ以前の問題として計算条件に与えた風速が現場のものと大きく異なっていることが原因と考えられる。実際に1991年7月7~8日の計算条件として与えた時間平均風速は東京灯標における観測値よりも2日間平均で1.7m/s、最大で5.3m/sも小さいものであった。風速の時空間分布と湾内流動の関係の重要性は灘岡ら¹⁴⁾も主張しており、鉛直混合スキームの境界条件である風速の与え方について再検討する必要がある。

(3) 湾奥部の時計回り・反時計回りの循環流

図-7に1991年6月21日、7月17日、8月12日において計算で得られた深さごとの残差流ベクトルを示す。なお、ここでの残差流は同日0~翌日0時の平均流とし、深さ方向は表層、上層、中層、下層、底層の5つに区分してそれぞれ表層から1~2層、5~7層、10~12層、15~17層、20~21層(最下層)で平均している。

まず、1991年6月21日の結果を見ると表層では湾奥部で、上層では湾全体で時計回りの環流が見られる。中・下層では表・上層と比較すると流速はかなり小さいが、湾奥部で反時計回り、湾中央部で時計回りの流れが見られることが分かる。1991年8月12日の残差流も6月21日の結果とほぼ同じ傾向にある。

1991年7月17日の結果は6月21日や8月12日の傾向と大きく異なり、上層では湾全体で、中層では湾奥部で反時計回りの循環流があり、表層では湾口から湾奥へ、下・底層では湾奥から湾口への概ね一様の流れとなっていることが分かる。図-8に計算に用いた1991年6月19~21日、7月15~17日、8月10~12日の風速を示してあるが、7月16日の午後から7月17日にかけて強い西南~南風が吹いていることが分かる。その風によって表層水は湾口から湾奥に吹き寄せられて下降し、中・下層で表層とは反対の流れが生じているものと考えられる。このような東京湾の循環流はこれまでの研究でも数多く報告されている^{15),16)}が、本モデルの計算においても同じような現象が現れたといえる。

(4) 風向・密度による循環流への影響

風向による循環流への影響を調べるため、次のような数値実験を行った。1991年7月16日0時の水位・流速・塩分濃度・水温を初期条件として、一定の風速7.3m/s(7月16日13時~7月17日0時の平均値)を領域内一様に48時間吹かせた。風向は16方位考え、それぞれの風向における残差流(後半25時間平均値)を求めた。

表-1に湾奥・湾中央部における風向の違いによる上・中・下層の残差流の変化を示す。湾奥部の結果を見ると、上層では西北西から南南東の風のときに反時計回り、その他の風向のときは時計回りの方向の残差流が発生しやすい傾向にあることが分かる。中層では、南南東風

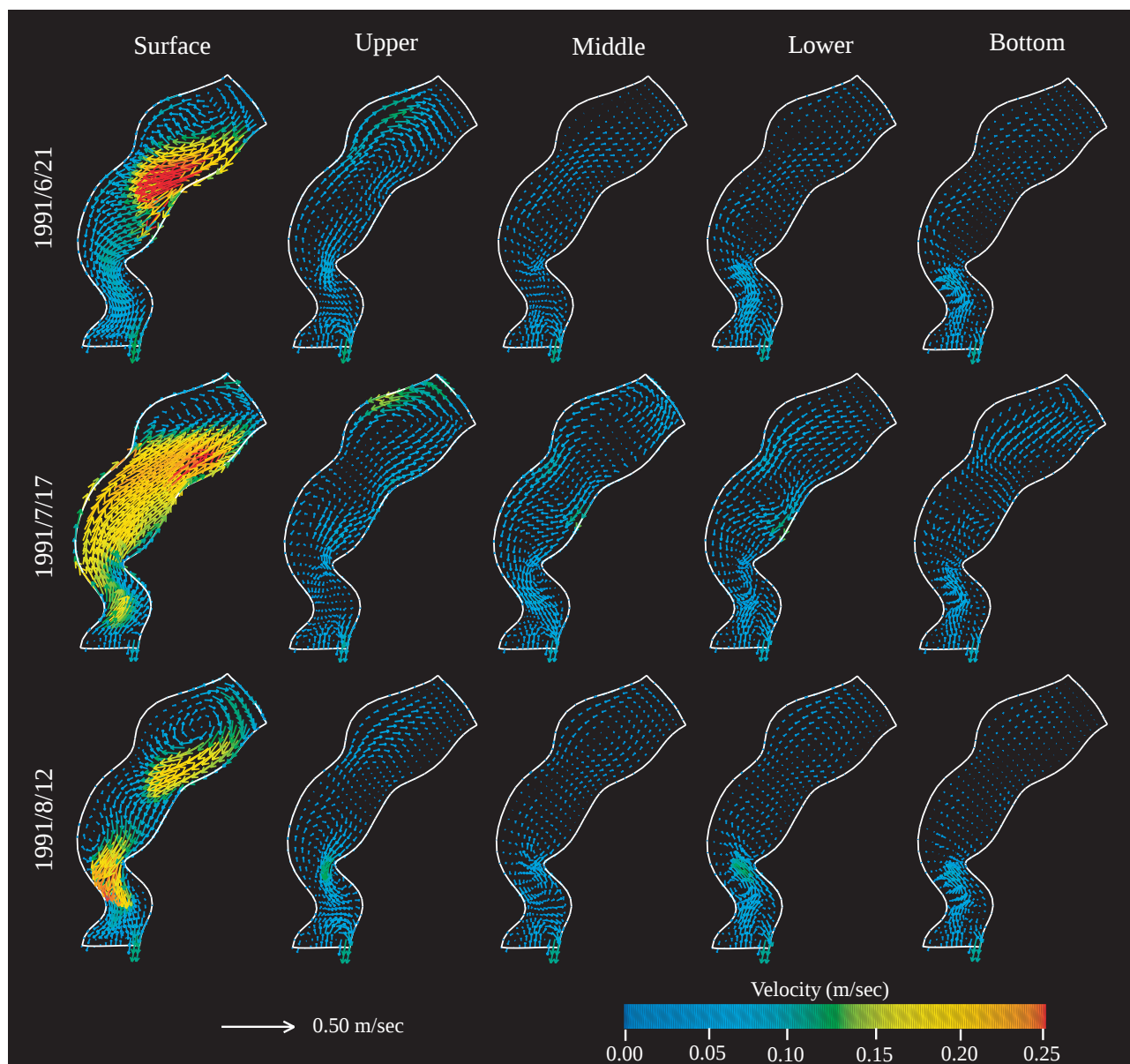


図-7 計算値の残差流ベクトル

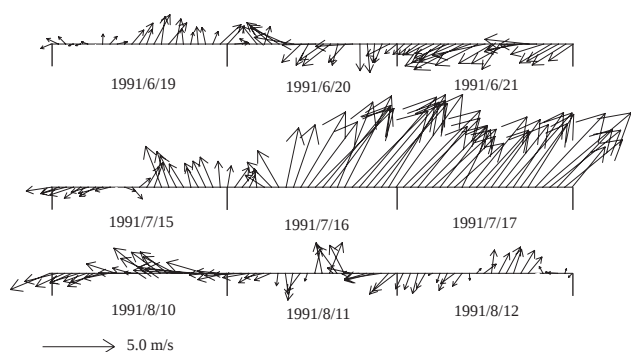


図-8 1991年6月19～21日，7月15～17日，8月10～12日の風速

のときのみ上層と反対方向の循環流が見られるが，その他は上層の流れの方向とほぼ同じである．

湾央部では，風向が西南西，南西風のときは湾央か

ら湾奥に向けての風となるため，上層では一様な湾奥に向かう流れが生じ，吹送された海水が湾奥で下降して中・下層では上層と反対方向の流れが発生している．また，南南西から南東風のときの上・中層及び南東風のときの下層で反時計回りの傾向が見られるが，その他の風向のときは概ね湾東側では湾口に，湾西側では湾奥に向かう流れとなっている．

水温・塩分濃度による密度流が湾内流動に及ぼす影響を調べるために，密度の影響がない(水温・塩分濃度に関わらず密度一定)条件で上述と同様の数値実験を行った．その場合には，西南西と南西の風では湾奥・湾央部のそれぞれ時計回り・反時計回りのが発生し，表-1とは逆回転の流れとなったが，他の風向のときの上層は先の数値実験と同じ方向の循環流が発生する傾向であった．中・下層については，いずれの風向においても表-1に見られた深さごとの流動特性の違いが小さくな

表-1 風向による湾奥・湾央部の残差流の変化

風向	上層		中層		下層	
	湾奥	湾央	湾奥	湾央	湾奥	湾央
西南西	R1	U	R1	D	D	D
南西	R1	U	R1	D	D	D
南南西	R1	R3-1	R1	R3-2	D	D
南	R1	R3-1	R3-2	R3-2	D	D
南南東	R2	R2	C1	R3-2	C1	D
南東	C1	R1	C1	R1	C1	R1
東南東	C1	C2	C1	C1	C3-2	C3-1
東	C1	C2	C1	C2	C3-2	C3-2
東北東	C3-1	C2	C3-2	C3-2	U	C3-2
北東	C3-1	C2	C3-1	C2	U	C3-2
北北東	C3-1	C2	C3-2	C1	U	C3-2
北	C3-1	C2	C3-2	C2	U	C3-2
北北西	C3-1	C2	C3-2	C3-2	U	C3-2
北西	C3-1	C1	U	C3-2	U	C3-2
西北西	R1	C2	R3-1	C1	R3-2	C1
西	R1	C1	R3-2	C3-1	R3-2	C3-1

R1:反時計回りの還流

C1:時計回りの還流

R2:湾西側で湾奥から湾央・湾口方向へ、湾東側で湾口・湾央から湾奥方向への流れが卓越

C2:湾西側で湾口・湾央から湾奥方向へ、湾東側で湾奥から湾央・湾口方向への流れが卓越

R3-1:湾東側で湾口・湾央から湾奥方向への流れが卓越

C3-1:湾東側で湾奥から湾央・湾口方向への流れが卓越

R3-2:湾西側で湾奥から湾央・湾口方向への流れが卓越

C3-2:湾西側で湾口・湾央から湾奥方向への流れが卓越

U:全体的に湾口・湾央から湾奥方向への流れ

D:全体的に湾奥から湾央・湾口方向への流れ

り、上層とほぼ同じ流れとなった。このような結果の違いは、安定であった成層が密度を一定にしたために中立となったため、流速シアによる鉛直混合が発達しやすくなり、風による応力が深さ方向に伝達されやすくなったことが原因として考えられる。西南西・南西の風のときは、湾口から湾奥南側に向けて表層外洋水が吹送され、湾奥北部では低塩分濃度、湾奥南部では高塩分濃度となるため、表層の風による応力と密度差による圧力が互いに反対方向となる。そのときに発生する湾奥部上・中層の循環流の方向は両者の力のバランスによって決定されていると考えられる。

これらの結果をまとめると、湾奥部においては南～南南東及び北西～西北西風が上・中層の時計回りと反時計回りの循環流を発生させる境となること、風向のみでなく密度差による圧力勾配も循環流の方向を決定する要因として無視できないことが数値シミュレーションの結果より明らかになった。ただし、本数値実験の結果は1つの初期条件で一定の風速・風向という限定された条件で行われたものであるため、東京湾の流動特性をより明確にするためには多くの条件を想定して数値実験を行い、検討する必要がある。

4. 結論

本研究では、移流スキームにCIP法を用いた σ 座標系の準3次元流動FEMモデルを構築し、東京湾に適用してモデルの有用性を検討した。また、それを応用して東京湾に見られる時計回り・反時計回りの循環流と風・密度の関係を検討した。得られた結論をまとめると次のとおりである。

- 移流現象の計算精度を検証するため本計算手法を段波問題に適用したところ、計算結果は解析解の水面形状を高精度に再現した。
- 東京湾の水温・塩分濃度の再現性を検証したところ、計算値の季節変動および鉛直分布は観測値とよく一致した。しかし、強風時に混合層の発達

過少に評価されるなどの問題を残しており、鉛直混合スキームの境界条件である風速の与え方について再検討する必要がある。

- 東京湾の湾奥部においては南～南南東及び北西～西北西風が上・中層の時計回りと反時計回りの循環流を発生させる境となっている。
- 深さ方向による流速分布の違いや循環流の方向を決める要因として水温・塩分濃度勾配は無視できない。

謝辞: 本研究の一部は科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」(研究代表者:辻本哲郎)の成果である。また、本研究では東京湾の海底地形についてはJODCの500mメッシュ水深データ、気象条件については気象庁の地上気象観測時日別データを用いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 中辻 啓二, 尹 鍾星, 白井 正興, 村岡 浩爾: 東京湾における残差流系に関する三次元数値実験, 海岸工学論文集, vol. 42, pp.386-390, 1995.
- 渡辺 正孝, 天野 邦彦, 石川 祐二, 木幡 邦男: 秋季の東京湾における風の成層破壊と底層の無酸素水塊の湧昇過程, 土木学会論文集, No. 608/VII-9, pp. 13-29, 1998.
- 矢部 孝, 内海 隆行, 尾形 陽一 共著: CIP法, 森北出版株式会社, pp.1-222, 2003.
- 例えば, 中村 恭志, 石川 忠晴, 矢部 孝, 滝沢 研二: Soroban格子法に基づく浅水2次元自由水面流れの計算手法の開発, 水工学論文集, vol. 49, pp. 685-690, 2005.
- 中山 恵介, 清木 莊一郎, 石川 忠晴, Alex S.J. Wyatt: 東京湾におけるフロント形成過程の究明, 水工学論文集, vol. 49, pp. 1291-1296, 2005.
- 中山 恵介, 芝口 芳行, 日向 博文, 石川 忠晴: 東京湾の湾奥における時計回りの循環と収束現象の解明, 水工学論文集, vol. 49, pp. 1297-1302, 2005.
- UNESCO: Tenth rep. of the joint panel on oceanographic tables and standards, UNESCO Tech. Pap. in Marine Science, No. 36, UNESCO, Paris, pp. 1-25, 1981.
- 棚橋 隆彦: 計算流体力学, 共立出版, pp. 1-325, 2006.
- Mellor, G.L.: One-dimensional, ocean surface layer modeling: a problem and a solution, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 31, pp. 790-809, 2001.
- 石川 一郎・辻野 博之・平原 幹俊・中野 英之・安田 珠幾・石崎 廣: 気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)解説, 気象研究所技術報告, 第47号, pp. 1-189, 2005.
- Kondo, J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Bound.-Layer Meteor.*, vol. 9, pp. 91-112, 1975.
- 東 博紀, 木幡 邦男: 東京湾における赤潮発生形態の変化, 水工学論文集, vol. 51, pp. 1303-1308, 2007.
- 国立環境研究所: 東京湾青潮発生海域調査資料, 国立環境研究所, pp. 1-140, 1995.
- 灘岡 和夫, 二瓶 泰雄, 吉野 忠和: 東京湾における風系の時空間変動と湾内海水流動への影響, 海岸工学論文集, vol. 44, pp.396-400, 1997.
- 宇野木 早苗: 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp. 1-672, 1993.
- 例えば, 田中 昌宏, 稲垣 聡, 八木 宏: 東京湾成層期の流動のリアルタイムシミュレーション, 海岸工学論文集, vol. 44, pp. 386-390, 1997.

(2007.9.30 受付)