

風速 3.2 m/s を与えた。

水平方向ならびに鉛直方向の渦動粘性係数はそれぞれ $40 \text{ m}^2/\text{s}$, $0.005 \text{ m}^2/\text{s}$ を与えた。また、成層効果は成層化関数を導入して表現した(中辻, 1994)。渦拡散係数に関しても同様の取り扱いを行った。

開境界において、半日周期の潮汐変動を城ヶ島の観測値(振幅 0.38 m, 遅角 146 度)に基づいて与えた。時間ステップは CFL 条件を考慮して 30 秒とした。

(3) 数値実験の内容

計算の手順は、最初の 6 潮汐は潮位変動のみを与えた。1 潮汐間の潮位変動が前の 1 潮時の変動とほぼ同一になるのを確認した後に、河川水の流入や水表面での熱収支の変化を徐々に与え、再び 1 潮汐間の変動の再現性を満たすまで 50 潮汐の計算を行った。その後、続いて南西風と北東風の風外力を与えた計算を 10 潮汐分実施した。

風外力は水表面でのせん断として与え、南西風と北東風を与えた。南西風は夏期の東京湾で卓越した風向きであり、海上における夏期の平均風速 6 m/s を与えた。一方、北東風は初秋にしばしば発生し、湾奥で離岸風として吹くため、湧昇現象を生起させる主要因であるとも考えられている。北東風も南西風に合わせて 6 m/s とした。

数値実験の内容は外力によって次の 4 ケースを設定した。①潮汐、②潮汐+密度流、③潮汐+密度流+吹送流(南西風)、④潮汐+密度流+吹送流(北東風)。

(4) 数値モデルの再現性の検証

採用した数値モデルが夏期の流動を十分再現できるか、否かを検証するために、潮位変動と潮流楕円による実測値との比較を行った。

潮位変動の比較は図-1 の St. 1~St. 4 の富津、横浜、千葉、東京の 4 地点において行った。その結果を図-2 に示す。振幅を比較すれば、湾奥部で計算値が観測値よりもやや大きく、約 4 cm の差がある。一方、遅角は St. 4

以外はほぼ一致している。これらの差は湾奥での流動を議論する上で許容範囲にあり、十分な再現性があると判断した。

潮流楕円の比較の例を図-3 に示す。観測点は図-1 の

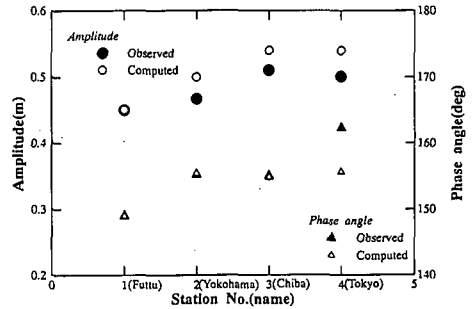


図-2 潮位の比較

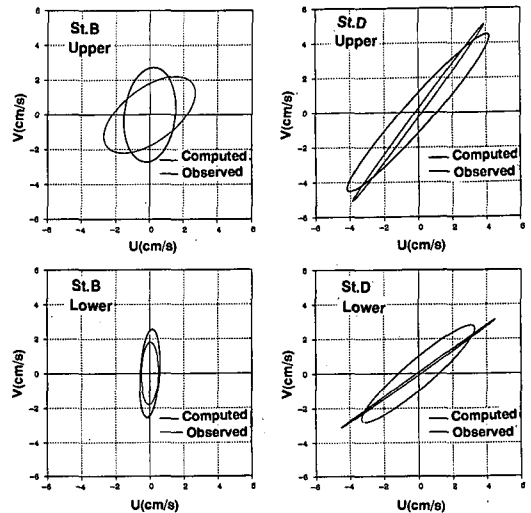


図-3 潮流楕円

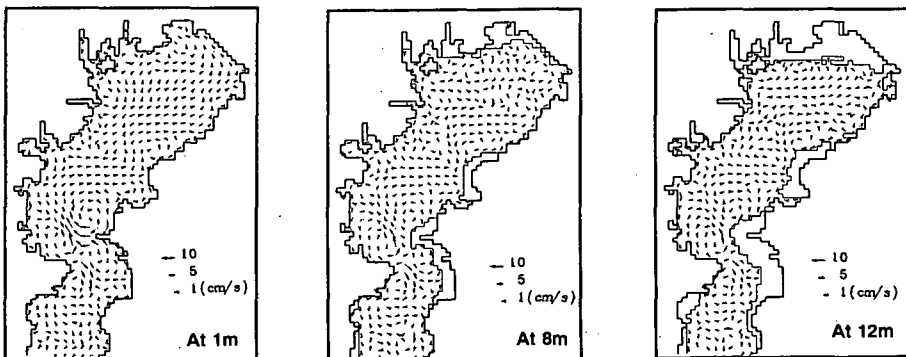


図-4(a) 一様密度場での残差流系

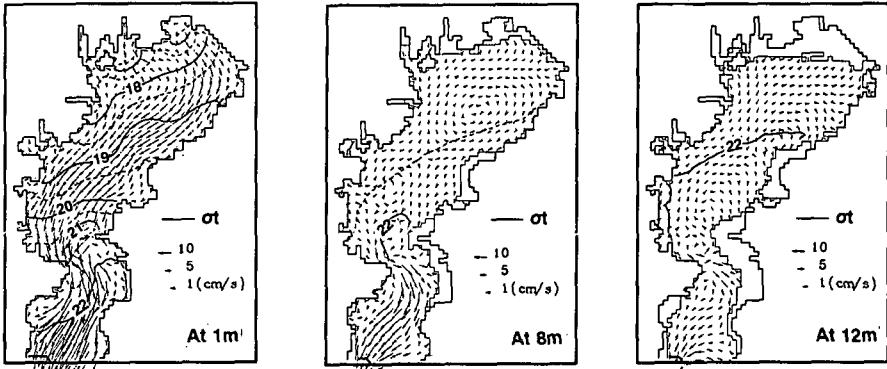


図-4(b) 潮流と密度流を考慮した残差流系 (無風状態)

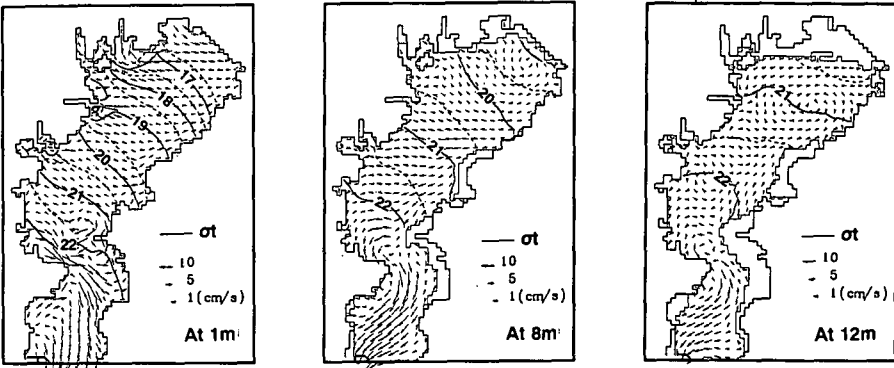


図-4(c) 吹送密度流の残差流系 (南西風: 6 m/s)

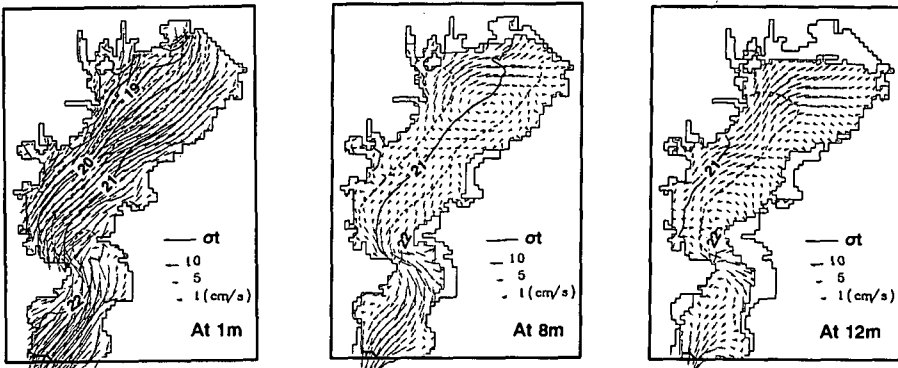


図-4(d) 吹送密度流の残差流系 (北東風: 6 m/s)

St. B と St. D の上層と下層である。全てが良好に一致しているとは言いがたいが、東京湾湾奥での流速の絶対値が小さいことを勘案すれば、合致度は満足すべき範囲にある。

4. 数値計算結果

(1) 残差流系の水平方向分布

図-4 は設定した条件で計算された残差流系と残差密度分布を示す。環境庁 (1993) の報告によれば、夏期の湾奥部で水温、塩分、DO が急変する密度界面の存在が見られ、その水深は5 m から10 m であった。そこで、水深

1 m, 8 m と 12 m での残差流系を比較のために示した。

図-4(a) は密度を一樣として潮位変動のみを与えた場合の残差流を示す。富津沖に時計廻りの循環（地形性潮汐残差流）が見られる程度であり、湾奥では流動がほとんどない。これに対して、図-4(b) の密度流を考慮した計算では、水深 1 m の表層では河川水に引きずられるように湾奥から湾口へ向かって 10 m/s を越す流れが認められる。図-4(a) と比較して最も大きな違いは水深 5~8 m 層に現れる時計廻りの循環である。湾奥の上層に時計廻りの循環が現れることは大阪湾（中辻ら, 1994）や伊勢湾（杉山ら, 1994）でも確認されている。この循環は藤原ら（1994）の指摘した高気圧性渦と同じ物理機構によるものと推測できる。富津沖の循環は両図で見られることから、その成因は潮汐残差流である。

図-4(c) はさらに南西風を与えた場合の残差流系の結果である。湾奥の 1 m 水深では東に向かう流れが生じ、また 8 m 水深では西に向かう流れが生じている。無風状態で見られた時計廻りの循環は消失している。時計廻りの循環はむしろ水深 20 m 層に明瞭に認められる。密度分布も大幅に変わり、 $\sigma_t=17$ の水塊は湾奥部に停滞し、成層化が発達している。また、等密度線が湾軸に直交しており、湾軸方向に鉛直二次元吹送密度流として取り扱うことも可能である。

図-4(d) は北東風を与えた場合の残差流系である。8 m 水深では湾軸に沿って南西に向かう 10 cm/s を越す

流れが生じている。また、下層では水深の深い横浜沖に沿った湾奥向きの流れが生じている。8 m 水深では湾奥で時計廻りの循環が現れている。しかも、循環強度は図-4(b) よりも大きくなっている。もう一つの注目すべき特徴は、等密度線が湾軸に平行になっていることがあげられる。宇野木（1990）によれば、このような平行した等密度線をもたらし原因は、地球回転の影響を受けた表層水の沖方向へのエクマン輸送とそれを補償する流れであると指摘している。

(2) 残差流系の鉛直断面内分布

東京湾の流動・密度構造を三次元的に捉えるために、図-1 の A-A, B-B 断面での残差流速と残差密度分布を図-5 に示す。右図はそれぞれ B-B 断面を直交する流速を示しており、実線が湾口への流出、破線が湾奥への流入の流速を示す。太線が流速 0 m/s の等値線である。

風無し（図-5(a)）の場合：湾奥部の上下層の σ_t の値は約 19.5~21.5 であり、成層状態が発達していることが分かる。湾軸方向の等密度線は海水面とほぼ平行である。これに対して、直交断面の流速分布は流速 0 m/s の線が右下がりになっており、西岸で流入、東岸で流出する傾向にある。5 m 水深の近くで、湾奥向き流速が 2 m/s、湾口向きが 3 m/s であり、湾奥の中央部で循環流が生起していることを裏付けている。

南西風（図-5(b)）の場合：水表面近傍では風のせん断を受けて湾奥に向かう流れがある。その結果、等密度

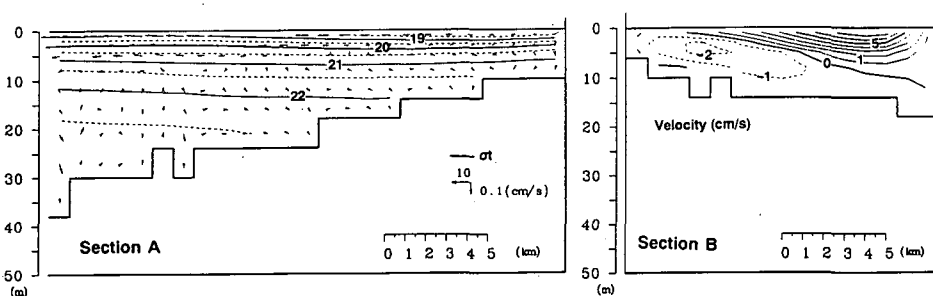


図-5(a) 残差流系の鉛直断面内流速と密度分布（無風状態）

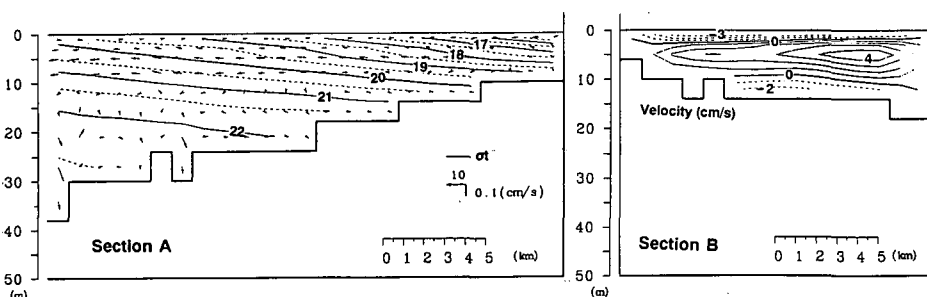


図-5(b) 残差流系の鉛直断面内流速と密度分布（南西風：6 m/s）

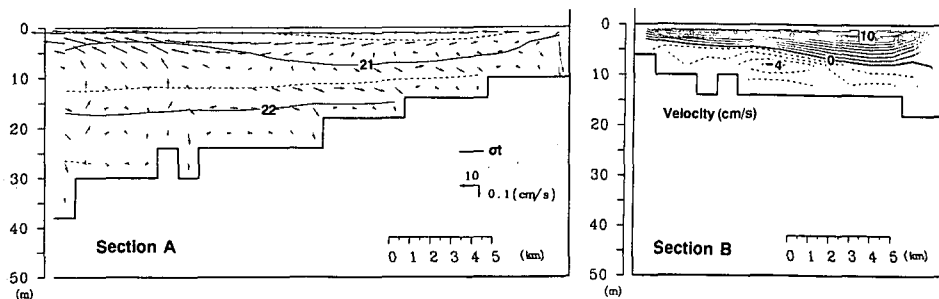


図-5(c) 残差流系の鉛直断面内流速と密度分布 (北東風: 6 m/s)

線が塩水楔状に湾奥に向かって下がる傾向になる。しかし、横断面図に示される流動は、表層 3 m 近くでは湾奥向き、水深 3 m~10 m の中層では湾口向き、そして下層部では湾奥向きの 3 層構造になっている。

北東風 (図-5(c)) の場合: 表層では湾口向きの流れが強まるが、湾奥部では連行現象が生じており、 σ_t の等値線は湾口方向に一旦鉛直方向に拡がってから、再度薄くなっている。B-B 断面の流れは上層で湾口向き、下層で湾奥向きの流れとも大きくなっている。

5. 考察とまとめ

東京湾の残差流系とその成因を三次元パロクリニックな流れの数値実験で検討した。

潮流と地形特性によって生じる潮汐残差流は富津岬付近の循環流に限られている。東京湾の残差流系の生成に関しては、潮流よりも密度流効果が支配的であることが分かった。湾奥の上層に形成される時計廻りの循環流は、藤原ら (1994) が大阪湾の西宮沖循環流の生成機構として提示した高気圧性渦で説明が可能である。すなわち、図-4(b)に見られるように、東京湾では密度勾配によって上層では湾口に、下層では湾奥に向かう流れが存在している。湾奥で下層から上層への湧昇、つまりエスチュアリー (鉛直) 循環が生じる。下層から湧昇した海水は水平発散で拡がる過程で地球の回転の効果を受けて、時計廻りの循環流を形成する。これが、大阪湾、伊勢湾、東京湾等、閉鎖性で、且つ河川水の流入が大量である海域に共通して見られる循環である。

風外力が密度流の残差流系に与える影響は複雑である。風外力が底層の湧昇現象をもたらす要因にエクマン輸送がある。宇野木 (1990) は、北東風が連吹したときに、東京湾の東海岸 (千葉側) での表層水が沖方向に輸

送され、その表層近くの海水を補うために、底層の海水が沿岸の狭い範囲で湧昇することを指摘している。その結果、等密度線は図-4(d) のように東岸で平行になる。また、図-4(d) の高気圧性循環が強化されるのは、北東風が上層の流れを加速することと強い相関がある。

南西風が連吹するときにも全く同様な現象が西岸 (東京側) にも起こるはずであるが、図-4(c) と (d) では似ても似つかぬ密度分布を示している。河川水の流入が西岸に集中しており、湧昇した海水との混合が密度流的な特性を弱めることが原因であろうと推測できるが、まだ未解決の問題である。

参考文献

- 宇野木早苗 (1990): 東京湾の湧昇と青潮, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 157-158.
- 環境庁水質保全局 (1993): 青潮発生予測手法の確立調査報告書, 153 p.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・水鳥雅文 (1994): 伊勢湾北部海域の密度成層と残差流, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 291-295.
- 中辻啓二 (1994): 大阪湾における残差流と物質輸送, 土木学会水理委員会, 水工学シリーズ 94-A-9, pp. 1-28.
- 中辻啓二・末吉寿明・藤原建紀 (1994): 大阪湾奥で観測される高気圧性渦 (西宮沖循環流) の生成機構と淀川ブルームに及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 331-335.
- 中辻啓二・許 再寧・室田 明 (1991): 3 次元表層密度流の数値実験, 土木学会論文集, 第 432/-15, pp. 29-38.
- 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.
- 村上真裕美・大西行雄・原島 省・國司秀明 (1987): 瀬戸内海における水温, 塩分分布のシミュレーション, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 15, No. 2, 130-137.
- 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, pp. 1-50.
- 尹 鍾星 (1993): 成層水域における貧酸素水塊の湧昇現象に関する水理学的研究, 大阪大学学位論文, 163 p.