

診断モデルによる 8 月の紀伊水道における 残差流シミュレーション

藤原正幸*・大橋行三**・藤原建紀***

1. はじめに

夏季の紀伊水道では“沿岸水は四国沿いに南下し、いれかわりに東側の紀伊半島沿いに外洋水が北上して、表層の等塩分線は S 字型を示す”(日本海洋学会沿岸海洋研究部会, 1992)とされていた。しかしながらこれは流れが実際に計測されたわけではなく、表層の塩分分布から推測されたものであり、詳細な流動場はまだ明らかになっていない。ただ ADCP の普及により、ある期間に限っては鉛直 2 次元断面での残差流が複数の断面において明らかにされ、今まで不十分だった数値シミュレーション結果の詳細な検証が可能となる状況が整備されつつある。また紀伊水道は外洋の影響を大阪湾に伝える緩衝領域となっており、夏季には栄養塩が外洋から紀伊水道に流入することが観測されている(藤原ら, 1997)。このように紀伊水道の流動は大阪湾ひいては瀬戸内海の水質を考える上でも重要な意味を持つ。

紀伊水道の流動場については 1996 年 8 月 6~8 日にかけて紀伊水道を横断する 2 断面において、ADCP による 25 時間連続観測が行われ、残差流が求められている。また紀伊水道はそれを囲む 3 府県の水産試験場が月に一度沿岸定線観測を行っており、水温・塩分・密度等の分布については流動場とは対照的に豊富なデータの蓄積がある。1996 年 8 月は ADCP による流動観測をはさんだ 1~9 日にかけて定線観測が実施されているので、ほとんど一斉観測に近い同時性の高い密度場と流動場のデータセットが得られた。

そこで本研究では診断モデルを用いることにより、観測された密度場に対応する流動場を求め、その結果を 2 断面の ADCP データを用いて検証し、紀伊水道の夏季の残差流構造を検討することとした。

2. シミュレーションモデル

(1) 診断モデル

診断モデルは与えられた密度場に対応する水塊運動を

計算するモデルである。言い換えれば流速場が、観測された水温と塩分から得られた密度場に対応するように決定される。従って診断モデルは密度場に関しては現地を再現していることになり、その意味においては予報モデルよりも信頼性は高いと考えられる。本研究で用いた基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla_h \cdot (UU) + \frac{\partial(UW)}{\partial z} + f\mathbf{k} \times U \\ = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla_h \cdot (\nu_h \nabla_h U) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) + T_s \cdots (1)$$

$$\nabla_h \cdot U + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \cdots (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \int_{-H}^{\eta} U dz = 0 \cdots (3)$$

$$p = g \int_z^{\eta} \rho dz \cdots (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_h \cdot (U\rho) + \frac{\partial(W\rho)}{\partial z} \\ = \nabla_h \cdot (K_h \nabla_h \rho) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \gamma(\rho_{ob} - \rho) \cdots (5)$$

$$T_s = -(\mathbf{u} \cdot \nabla_h) \mathbf{u} - w \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \cdots (6)$$

$$UU = \begin{bmatrix} UU & UV \\ VU & VV \end{bmatrix} \cdots (7)$$

ここで $U(U, V)$ は水平 2 次元残差流ベクトル、 W は鉛直流速、 ∇_h は水平微分演算子、 $f (=8.16 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1})$ はコリオリのパラメータ、 $\mathbf{k}$ は鉛直単位ベクトル、 p は水圧、 $\nu_h (=0.016 \times T_p \times U_{am}^2 \text{ (m/s)})$: T_p は潮汐周期、 U_{am} は潮流振幅、 $\nu_v (= \nu_h \times 10^{-5})$ はそれぞれ水平・鉛直渦動粘性係数、 T_s は潮汐応力、 $g (=9.8 \text{ m/s}^2)$ は重力加速度、 η は平均水面からの水位上昇量、 H は水深、 ρ は密度、 $K_h (=1 \text{ m}^2/\text{s})$ ・ $K_v (=1 \text{ cm}^2/\text{s})$ はそれぞれ水平・鉛直乱流拡散係数、 γ は係数 ($=0.5/\Delta t$: Δt は時間ステップ)、 ρ_{ob} は観測値より推定された密度、 $u(u, v)$ 水平 2 次元 M_2 分潮流速ベクトル、 w は M_2 分潮の鉛直流速、 t は時間、 z は鉛直上方を正とした座標軸、式 (6) のバーは 1 潮汐周期の平均を表す。

* 正会員 農博 愛媛大学助手 農学部生物資源学科

** 正会員 農博 愛媛大学教授 農学部生物資源学科

*** 正会員 農博 京都大学大学院助教授 農学研究科

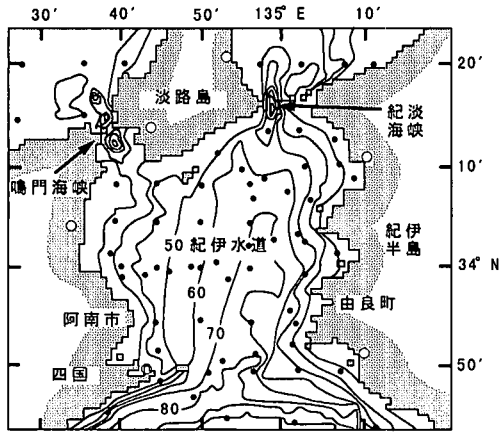


図-1 紀伊水道地形図 (単位: m) 及び水温・塩分観測点

境界条件は自由水面に対して

$$\rho \nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=\eta} = \rho_a \gamma_a^2 |W_w| W_w \dots\dots\dots (8)$$

ここで ρ_a は空気 の密度 ($=1.23 \text{ kg/m}^3$), γ_a^2 は自由水面の摩擦係数 ($=0.0013$), W_w は水平二次元風速ベクトルである。また海底では、

$$\nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=-H} = \gamma_b^2 |U| U \dots\dots\dots (9)$$

となり、ここで γ_b^2 ($=0.0026$) は海底摩擦係数である。陸地境界はノースリップ条件とした。

潮汐応力については、バロトロピック条件で潮流計算を行ってあらかじめ求めておく必要がある。その際に潮流振幅も計算し、 ν_h の評価に利用する (Fujihara and Kawachi, 1995)。得られた ν_h 値は鳴門海峡で $800 \text{ m}^2/\text{s}$ 、紀淡海峡で $300 \text{ m}^2/\text{s}$ であった。また最低値は $1 \text{ m}^2/\text{s}$ と設定した。

基礎方程式の離散化には有限差分法を用いた。その際非定常項には前進差分、移流項には二次精度上流差分、拡散項には中心差分を用いて近似した。

(2) 対象海域

図-1 に対象海域を示す。ほとんどの領域が水深 80 m 以浅であり、比較的深い領域が太平洋から紀淡海峡に向かってのびている。対象海域を水平方向に 1 km 四方の格子で、鉛直方向には 10 層 (海面-2 m, 2-5 m, 5-10 m, 10-20 m, 20-30 m, 30-40 m, 40-50 m, 50-75 m, 75-100 m, 100 m-海底) に分割し数値計算を行った。ただ境界の影響を小さくするために、図-1 に示した対象海域の上下に 10 格子分だけ仮想の領域を作り、そこで渦動粘性係数を大きくしてスポンジ境界とした。仮想領域の水深は実領域の最も外側の水深と等しくおいた。

3. 密度場

紀伊水道を含むモデル海域は和歌山県・大阪府・徳島

県の水産試験場が月に一度沿岸定線調査を行い、図-1 中に示した黒丸の位置で各水深の水温や塩分が明らかになっている。

1996 年 8 月上旬の水温・塩分分布については以下のような特徴がある。まず水温分布については、水面から 10

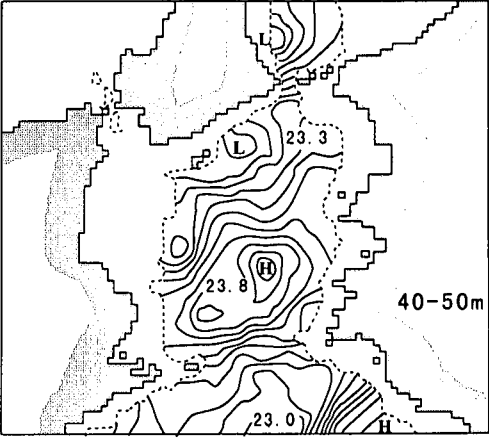
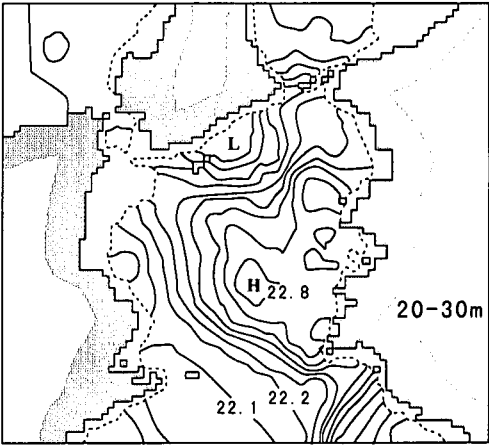
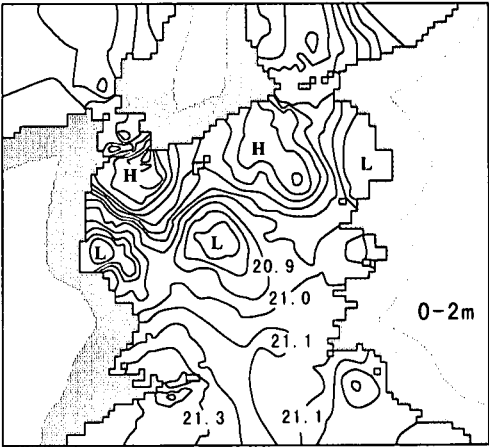


図-2 補間された密度場 (σ_t)

mまでは28°C以上の暖かい水が紀伊半島側に存在し、鳴門海峡での潮汐混合によると考えられる27°C以下の冷たい水が四国沿いに存在している。20 m以深では紀伊水道の中央部に冷たい水が存在している。塩分分布に関しては、30 m以浅では吉野川の影響と考えられる比較的塩分の低い海水が四国沿いに存在し、紀伊水道側は比較的塩分の高い海水が存在している。それ以深ではほぼ一様である。

これらの水温及び塩分分布から Knudsen の状態方程式により密度を算出し、以下のような方法で観測値を計算格子の値に補間する。空間的に疎な観測データから計算格子における密度を求めるため、客観補間法を用いる。まず各観測点において深さ方向に既知のデータから線形補間で各層の密度を計算する。次に求めたい格子から観測点までの距離 L_i に反比例して重みのかかる以下の式により水平的に客観補間を行い、格子密度を推定する。

$$\rho_{ob} = \frac{\sum_i \rho_{oi}}{\sum_i \frac{1}{L_i}} \quad (10)$$

この際影響半径を3 kmとし、その中に3個以上の観測点がない場合は影響半径を1 km ごとに増やして、最低でも3個の観測点から補間するようにした。最後に、求められた格子密度を滑らかにするために、自分自身と隣接する8個の格子で値を平均し、自分自身を平均値で置き換える操作を行う。

補間された密度場 (σ_t) の一例を図-2 に示す。10 m 以浅では軽い水が紀伊水道中央部と吉野川及び紀ノ川河口に存在している。20 m 以深では重い水が和歌山県の由良町沖から紀伊水道中央部にかけて存在している。全体としては、20 m 以浅では紀伊水道中央部の海水は紀伊水道北部や太平洋側よりも軽く、それ以深は逆となっている。

4. 風速ベクトル場

紀伊水道周辺で気象庁のアメダスによって毎時風向風速が測定されている場所が8ヶ所ある(図-1の○印)。前述した客観補間法を用いて1996年8月6-8日の平均風から紀伊水道上の風ベクトル分布を推測した。補間に先立ち一般に海上風は陸上風の2倍程度であるため、観測された風ベクトルを2倍しておく。その結果を図-3に示す。紀伊水道西側で南風、東側で南西風が卓越している。風速はほぼ5 m/s程度である。

5. 潮汐応力場

潮流に関しては卓越している M_2 分潮のみを考慮し、周期的定常状態になった一潮汐分を取り出し(6)式により潮汐応力を計算した。図-4に表層の潮汐応力分布を示す。潮汐応力は鳴門海峡 (0.04 cm/s^2) と紀淡海峡

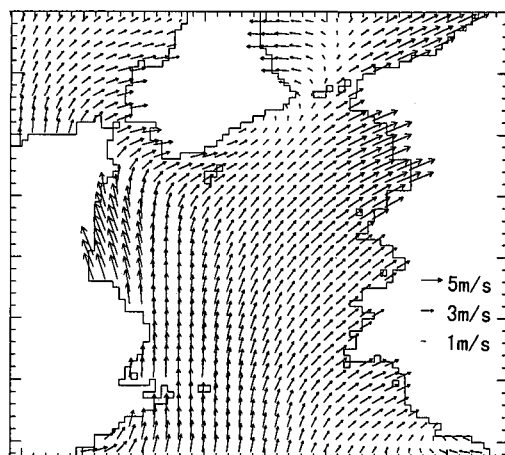


図-3 風速ベクトル場

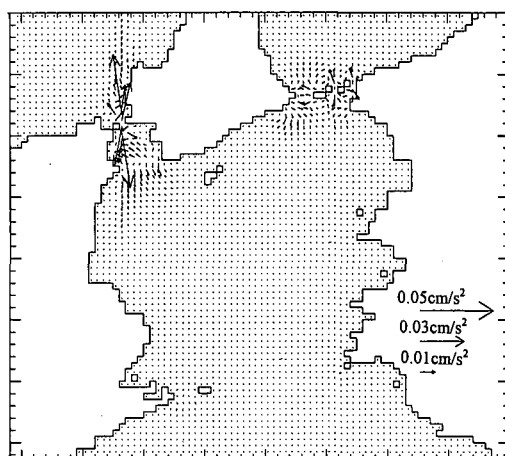


図-4 潮汐応力場

(0.01 cm/s^2) を除いてきわめて小さい。また他の層もほぼ同じような分布であった。

6. 結果及び考察

(1) 計算結果と ADCP のデータとの比較

ADCP による現地観測データを図-5に、同じ位置での計算結果を図-6に示す。観測データから、上層に関しては、紀淡海峡を通り南下してきた流れが、紀伊水道中央部で西に方向を変え四国側を南下している様子が推定できる。中層では、傾向は上層と同じであるが、流速が小さくなる。また下層では逆に北上流となってお阪湾に流入する流れとなっている。シミュレーション結果でも同様の傾向は再現されている。しかし北側の断面では観測値と計算値の流速の違いが南側に比べ大きくなっている。これは紀淡海峡周辺では潮汐周期平均の密度を用いていないことが一つの原因であると考えられる。海峡周

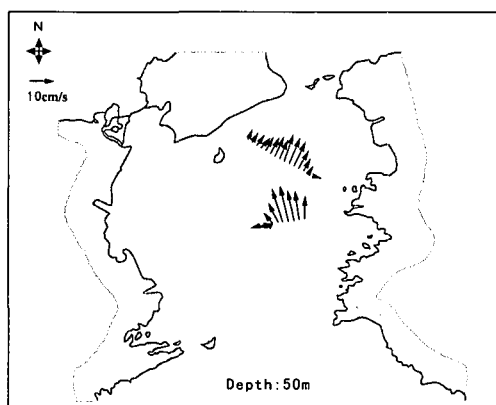
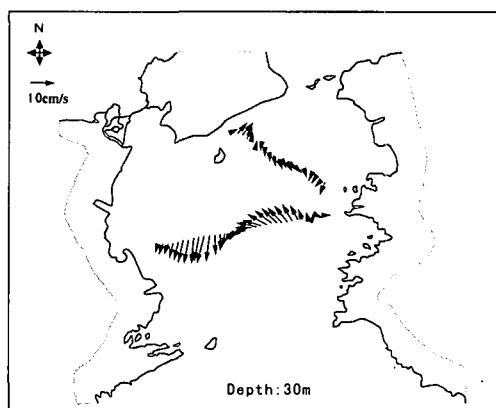
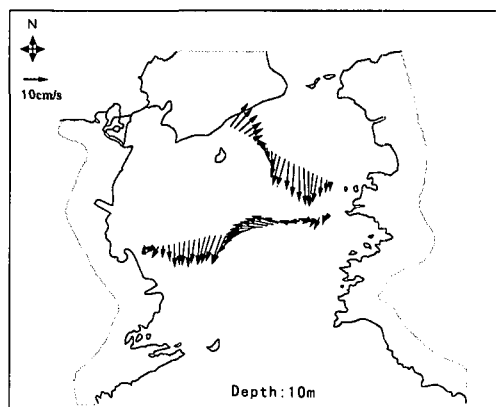


図-5 ADCP により観測された残差流

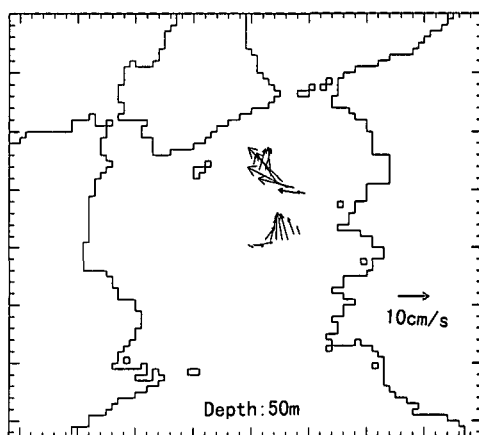
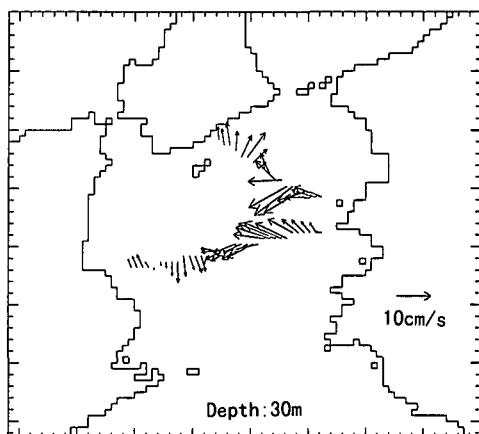
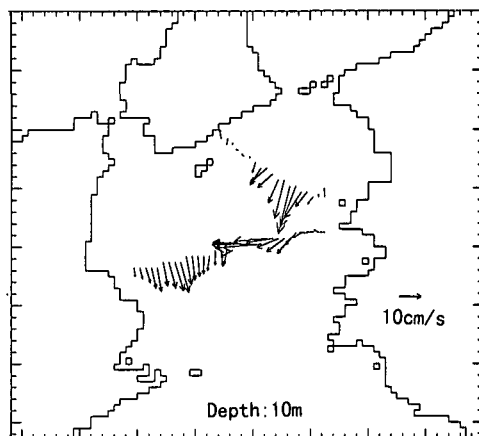


図-6 計算により得られた残差流

辺の密度は潮時によって変化すると考えられるため、一潮汐間の平均密度を用いることにより、現地観測結果にさらに近づくと思われる。

(2) 残差流構造

モデル海域全体の残差流を図-7に示す。残差流に関しては30m以浅では大阪湾から南下してきた流れが北緯34度付近に存在する反時計回りの渦により西に曲げられ徳島県寄りを南下し、阿南市沖で今度は流れを東向

きに変え、和歌山県に沿って太平洋に流出する形態となっている。この渦は高密度水塊の等密度線に沿って流れており、水深50m付近まで認められる。30m以深では紀淡海峡周辺で上層とは逆に大阪湾に流入する北上流が認められる。また潮汐応力や風応力を省略した計算結果と比較して、残差流は密度流が支配的であることが判明

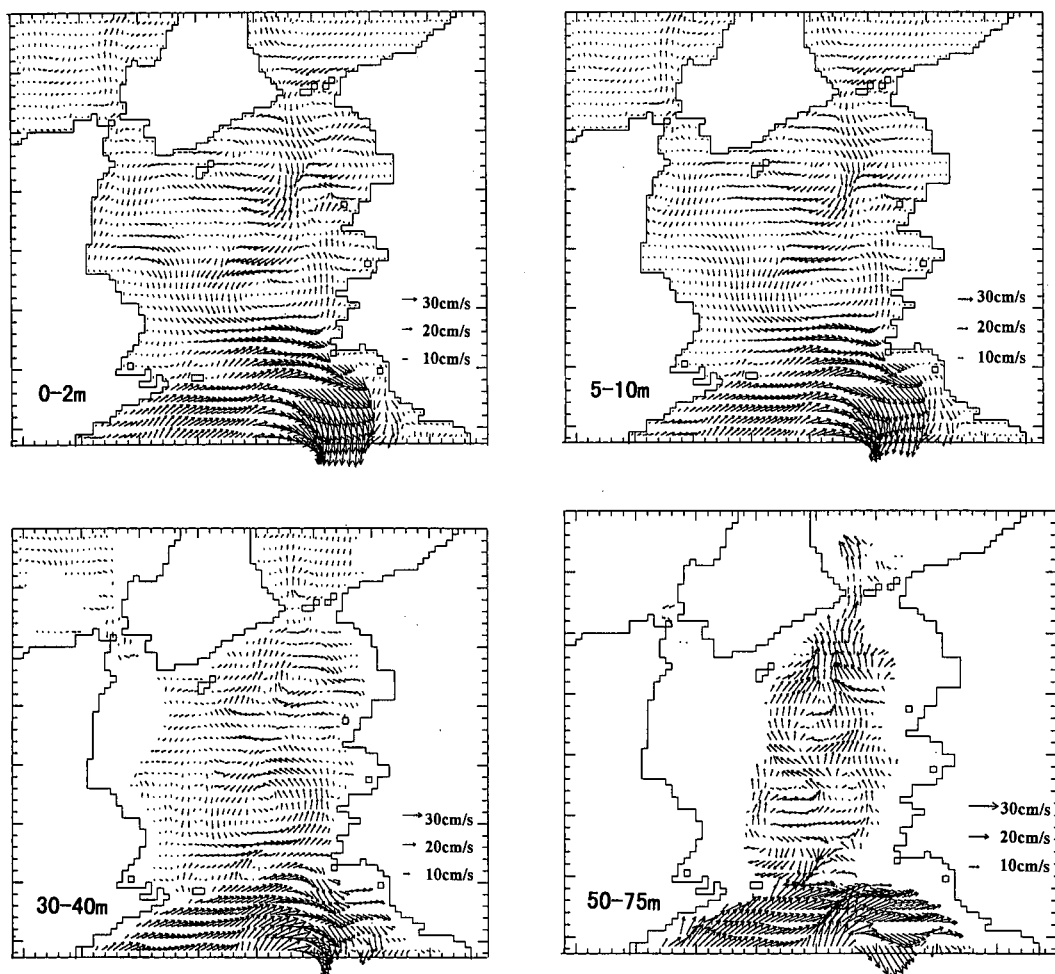


図-7 残差流計算結果

した。さらに運動方程式の各項の大きさを比較すると、ほとんどの領域で圧力勾配とコリオリ力が釣り合っていることから、地衡流的な流れとなっていることが明らかとなった。

大阪湾と接続している紀淡海峡では、水深 35 m までは紀伊水道に流入する南下流となり、それ以深では逆に大阪湾に流入する北上流となっている。

7. おわりに

診断モデルにより紀伊水道の夏季の残差流構造を検討した。計算結果は ADCP による観測結果により検証し、

比較的良好な一致を示した。これは同時性の高い密度場と流動場が得られたことによると考えられる。

参考文献

- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編(1992): 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, p. 634.
- 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本 亘 (1997): 外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1061-1065.
- Fujihara, M and T. Kawachi (1995): Kinematic eddy viscosity coefficients in residual current equations with tidal stress, 農業土木学会論文集, No. 176, pp. 233-240.