

DBF海洋レーダを用いたデータ同化による 3次元沿岸流動解析の試み

3-DIMENSIONAL COASTAL CURRENT ESTIMATION BY DATA ASSIMILATION USING DBF MARINE RADAR

坂井伸一¹・平口博丸²・松山昌史¹・坪野考樹¹・森信人²
Shin'ichi SAKAI, Hiromaru HIRAKUCHI, Masafumi MATSUYAMA,
Takaki TSUBONO and Nobuhito MORI

¹正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

The digital beam forming (DBF) marine radar with a very high frequency (VHF) can detect the sequential surface currents in the area of 20km squares every 500m in space and 15minutes in time. A nudging data assimilation model with the series of surface current maps from the DBF marine radar was applied to estimate 3-dimensional coastal currents in the north area of Ise Bay in winter. As to the point near the Kiso river mouth, the rms error of the surface currents between observations and model predictions over 8cm/s was reduced ~3cm/s in the north-east direction and ~4cm/s in the south-west direction by the assimilation. The vertical current profile from surface to 3m depth revised by the assimilation, but that below 3m depth was not revised well mainly due to only assimilating surface current data. The temporal interpolation of the data was efficient in the assimilation, which indicates that the DBF marine radar is useful because of highly densed data in time.

Key Words : DBF radar, data assimilation, nudging, coastal currents, Ise Bay

1. はじめに

本研究対象である伊勢湾北部海域では, 多くの主要産業施設が立地しており, 防災や環境保全などの面で, 沿岸流動場を監視・予測することが重要となる。その場合, 表層の流動場が特に重要となるが, 河川水や地形の影響を強く受け, 傾圧的な流れが卓越する内湾域では, 表層近傍においても鉛直的な流動変化が激しいと予想される。また, 本海域では, 沖合下層に存在する高温・高塩分の水塊が, 冬季季節風によって, 沿岸表層部に湧昇してくることが考えられ¹⁾, 発電所からの温排水拡散の実態を把握する上で, 3次元的な流動場の時間変動特性を把握することが必要となってくる。

海洋レーダ^{2), 3)}は, 表層の流速分布を一定時間間隔で連続かつ長期間観測できるため, 従来の船舶やブイなどの手法では困難であった計画的な広域流動観測が可能となる。特に, VHF帯の電波を用いるDBFレーダは, 約20km四方の流速分布を, 従来の海洋レーダに比べて1/4程度に相当する15分という短時間間隔で観測できるため, 前述のような内湾域における流動場の時間変動観測に適し

ている⁴⁾。

陸上リモートセンシングである海洋レーダは, 表層の流れしか観測できないが, データ同化手法を組み合わせることにより, 3次元流動場を推定することが可能となる。Lewis et al.⁵⁾は, モントレー湾を対象とした3次元流動モデルに対して, HFレーダの観測データをナッジングによって同化し, 表層流動場の推定精度を改善した。石塚ら⁶⁾は, 大阪湾を対象とした3次元傾圧モデルに対し, VHFレーダの観測データをナッジングおよびブレンディングの一種である直接法によって同化し, 残差流および塩分場の推定精度を向上させた。de Valk⁷⁾およびShen and Evans⁸⁾は, 鉛直流動分布を直交関数の線形和として求めるインバース法にHFレーダの観測データを代入し, 3次元流動場を推定している。このように, 近年海洋レーダのデータをデータ同化モデルに取り込んで, 3次元流動場を推定する研究が行われているが, 中層から低層にかけての流動分布の再現性や, 3次元流動場の時間変動に関する再現性については, 検討の余地が残されている。

本研究では, 冬季伊勢湾北部海域におけるDBFレーダの観測データを用いて, ナッジングによるデータ同化モ

デルにより、3次元流動場の時間変動を解析し、その再現性について検討する。傾圧的な流れが卓越する内湾域では、密度データを同化することも重要と考えられるが、空間的に密な密度データが得られなかったため、流速データのみを同化することにした。また、ナッジングでは、カルマンフィルタや変分法のように同化過程で物理法則を厳密に満たすことができないが、検討事例の少ない3次元流動場の時間変動解析に対して、取り扱いの容易なナッジングによって、どの程度再現性が得られるかを検討することは、データ同化モデルの有効性を検討する上では有用と考えられる。なお、解析結果の評価においては、河川流動、吹送流、潮汐流により時間変動の激しいと考えられる木曾三川前面域を中心に検討する。

2. 現地観測の概要

現地観測については、坂井ら⁴⁾に詳しいので、ここではその概略を簡単に述べる。図-1に、観測範囲および本計算対象領域を示す。観測は2002年2月18日から26日にかけて行われ、図-1のA局とB局に2組のDBFレーダを設置して、15分間隔で表層流動分布を測定した。また、◎で示した測点St. 1とSt. 2において、水深1mと2mに電磁流速計を設置し、DBFレーダの観測データと比較するための連続流速データを5分間隔で取得した。DBFレーダと水深1m層の電磁流速計の観測データを比較した結果、相関係数は南北成分が0.8程度、東西成分が0.7程度となり、標準誤差は南北成分が5cm/s～10cm/s程度、東西成分が7cm/s～9cm/s程度であった。期間中の2月23日に、測点A, B, C, Dにおいて、流速(ADCP)、水温、および塩分の鉛直分布を船舶によりスポット的に4回観測した。同じく測点AB, BC, CDにおいて、水温、塩分の鉛直分布を4回観測した。1回目(11:15, 上げ潮開始時)と4回目(16:15, 下げ潮開始時)のAからDにかけての塩分の鉛直横断分布を図-2に示す。B地点を中心に存在した河川影響の低塩分領域が、時間とともに不明瞭になっていることが確認できる。なお、観測期間中の水温はほぼ一様で、密度場に対しては塩分が支配的であった。

DBFレーダのデータに関し、A局では、設置場所の制約で、ビーム正面方向が観測対象領域の中心からずれてしまったことや、正面の知多半島や人工島などの影響で、ビーム番号4～8を中心にレンジ10km以遠の受信レベルが低くなる傾向が見られた。一方、B局では、アンテナ正面方向の見通しが良く、どのビームについても概ね良好なデータが得られた。本海域では、夜間を中心に間欠的な外来ノイズが発生したため、受信状態の悪いA局のビーム番号4～8では欠測となる場合が見られた。なお、図-1より、DBFレーダの観測領域は、本計算領域の湾奥部に限られているため、以後の解析結果の表示に関しては、DBFレーダの観測範囲を中心に示す。

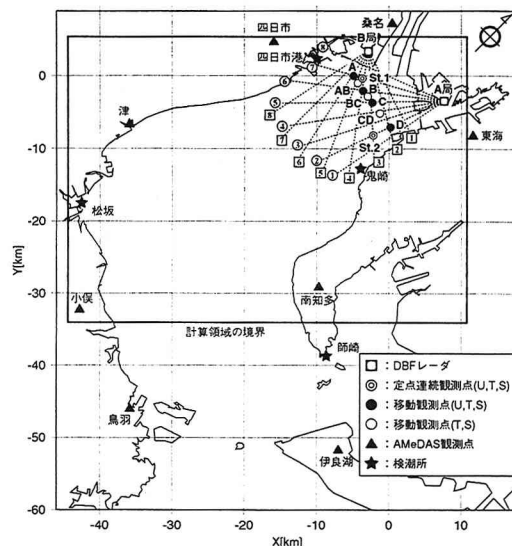


図-1 観測対象領域と計算領域

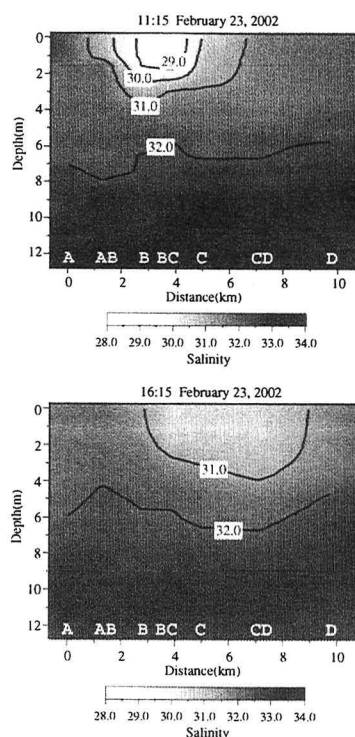


図-2 東西方向の塩分横断分布(上: 11時15分, 下: 16時15分)

3. データ同化モデルの概要

(1) モデルの基礎式

本同化モデルの基礎となる力学モデルは、潮汐、風、河川密度流を再現する準3次元モデルであり、外力としては、湾口の潮汐、海面の風応力(1時間間隔のAMeDASデータから推定した海上風)、および河口部で密度勾配(月平均値)を与える。基礎方程式を以下に示す。連続式と運動方程式に加え、上述したように場の密度場に対して支配的であった塩分の輸送方程式を考慮した。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} - fV = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} + \frac{\partial VW}{\partial z} + fU = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial V}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$0 = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial z} - g \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial US}{\partial x} + \frac{\partial VS}{\partial y} + \frac{\partial WS}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 U 、 V 、 W は3方向の流速、 f はコリオリのパラメータ、 ρ_0 は海水の基準密度、 P は静水圧、 A_x 、 A_y 、 A_z は各方向の渦動粘性係数、 g は重力加速度、 S は塩分、 K_x 、 K_y 、 K_z は各方向の渦動拡散係数である。このとき、海面の境界条件は以下になる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + U_s \frac{\partial \eta}{\partial x} + V_s \frac{\partial \eta}{\partial y} - W_s = 0 \quad (6)$$

$$\rho_0 A_x \frac{\partial U}{\partial z} = \rho_a C_D U_w |U_w| + \rho_0 \gamma (\hat{U} - U) |\hat{U} - U| \quad (7)$$

ここで、 η は水位、添字 s は水面を表し、 ρ_a は大気密度、 C_D は海面抵抗係数、 U_w は風速ベクトル、 γ はナッジング関数、 $\hat{U}$ および U は流速の観測ベクトルと予測ベクトルである。

(7)式において、右辺第2項がナッジングによる緩和項で、観測データとモデル予測値の流速差によるせん断力である。通常のナッジングでは、時間の逆数の次元を持つナッジング関数を用いて、観測値とモデル予測値の流速差を直接運動方程式に付加するが、本同化モデルではLewis et al.⁵⁾に倣い、せん断力としてモデルに作用させた。この場合、緩和項がレイノルズ応力の形でモデルに取り込まれるため、流速差を直接運動方程式に付加する場合に比べて、下層への同化効果の伝搬が良くなる。なお、この場合のナッジング関数 γ は無次元となる。ナッジングにおける同化効果は、ナッジング関数の値によって決まる。ナッジング関数は、一般的に各観測点毎に、観測値の標準偏差、観測時間とモデルの計算時間との差、ならびに観測点と計算格子点との水平および鉛直方向のずれの関数として定式化できるが、自由度の大きい大規模なモデルでは、計算モデル領域に対して、観測データの質・量が不十分な場合が多く関数化が難しいため、ナッジング関数を一定値である係数として扱う場合が多い。本研究では、後述するようにモデルの空間分解能(400m)と観測データの空間分解能(500m)がほぼ等しい

こと、時間方向については観測データを内挿する方法を採用するため、ナッジング関数を時・空間の関数として扱わず、係数として取り扱うことにした。

本モデルの場合、ナッジング項に関与する観測値とモデル予測値の流速差は、外力や境界条件に起因する誤差やサブグリッドスケールの流動現象に起因する誤差からなるモデル誤差(model error)、観測器の性能や人為的なミスによる観測誤差(measurement error)、およびモデル領域を観測領域へ変換する観測マトリクスに含まれる表現誤差(representativeness error)が成因として考えられる⁹⁾。ナッジングでは、これらの誤差成分の総和を新たな外力として付加し、流速推定値の精度の向上を図ることになる。Lewis et al.⁵⁾は、HFレーダの観測誤差を考慮して、モデル予測値と実測値のずれによるせん断力が単位時間になす仕事量と等しくなるような制約条件下で、二乗和が最小となるようせん断力を求めて、同化させる方法を検討している。これは、観測データのノイズ成分に対して空間フィルタをかけたことになり、以下のように定式化される。ただし、 A は海表面である。

$$\tau = (\hat{U} - U) \rho_0 \gamma \frac{\int_A (\hat{U} - U)^2 |\hat{U} - U| dA}{\int_A |\hat{U} - U|^2 dA} \quad (8)$$

本研究では、この空間フィルタについても検討した。

(2) 計算条件

表-1 計算条件

項目	内容
メッシュ分割	水平方向 400m 鉛直方向 7層(上から1.5m, 1.5m, 2.0m, 2.8m, 4.2m, 6.0m, 9.0m)
境界条件	河口 水位 松坂(三重県)と師崎(愛知県)の推算潮位 塩分濃度 流入時は初期値、流出時は2回微分=0 海表面 $\rho_0 A_x \frac{\partial U}{\partial z} = \rho_a C_D U_a (U_a^2 + V_a^2)^{\frac{1}{2}}$, $\rho_0 A_z \frac{\partial V}{\partial z} = \rho_a C_D V_a (U_a^2 + V_a^2)^{\frac{1}{2}}$ 海面抵抗係数 $C_D = 0.0013$ 大気密度 $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 海水密度 $\rho_0 = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ U_a, V_a : AMeDASの風速データを空間内挿し、2倍して海上風とした 海底面 non slip 陸域面 non slip 河口 河川流量 庄内川: 14.5m ³ /s, 木曽川: 165.4m ³ /s, 長良川: 69.7m ³ /s, 揖斐川: 46.9m ³ /s 塩分濃度 庄内川: 30, 木曽川: 26
渦動粘性係数	水平方向 $A_x = A_y = 5.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 鉛直方向 $A_z = A_{z0}(1 + 5.2R_t)^{-1}$, $A_{z0} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \leq A_z \leq 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
渦動拡散係数	水平方向 $K_x = K_y = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 鉛直方向 $K_z = A_z(1 + \frac{19}{10}R_t)^{-\frac{1}{2}}(1 + 10R_t)^{\frac{1}{2}}$, $1.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \leq K_z \leq 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
初期値	流速 静水 水位 0 塩分 1月~3月の平均分布 ¹⁾
計算	時間ステップ 15s コリオリ係数 $8.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

モデルの計算条件を表-1に示す。本計算領域は、三重県小浜と愛知県南知多を結ぶラインを外境界とし、水平

格子間隔400m, 鉛直方向は7層に分割した。境界条件を与えやすいようにx軸は北東方向, y軸は北西方向を正とし, 湾口(外境界)における水位は, 松坂と師崎の潮位推算データを与えた(図-3)。海表面では, 図-1に示す測点で得られたAMeDASの風データをスプライン補間で空間内挿し, 柳・井川¹⁰⁾に倣い値を2倍して海上風とした。河川流量については, 新名古屋火力発電所(7,8号系列)修正環境影響調査書 環境影響評価書¹¹⁾に記載されている平水量を設定した。水平方向の渦動粘性係数と渦動拡散係数については, 本海域で得られている過去の知見を基に設定し, 鉛直渦動粘性係数と鉛直渦動拡散係数については, 中辻¹²⁾によるリチャードソン数の関数形で成層強度を考慮した。計算初期の塩分分布は, 杉山・和田¹⁾が三重県水産技術センターと第四管区水路部の資料を元に作成した1~3月の平均分布を用いた。同化計算は, ADCPによる移動観測を実施した2月23日のみを対象とした。この期間, 3m/s~4m/sの北西風が卓越していた。

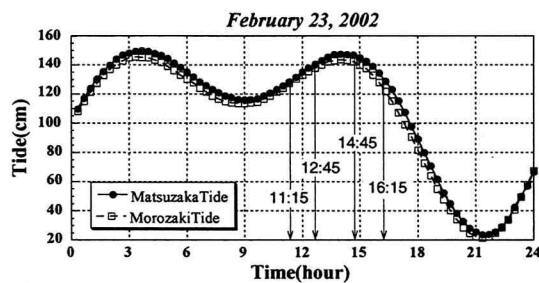


図-3 湾口の潮位

4. 解析結果

(1) 表層流動分布

表-2 計算ケース

計算 ケース	ナッジ 係数	時間 内挿	空間 フィルタ	St.1:rms差(cm/s)		St.2:rms差(cm/s)	
				u成分	v成分	u成分	v成分
case0	同化なし	—	—	8.15	13.58	7.04	12.01
case1	1.0×10^{-2}	なし	なし	7.70	13.32	6.75	11.85
case2	1.0×10^{-2}	あり	なし	4.08	7.37	4.00	7.39
case3	1.0×10^{-2}	あり	あり	5.00	7.81	4.54	7.64
case4	1.0×10^{-1}	なし	なし	5.97	11.64	5.73	10.62
case5	1.0×10^{-1}	あり	なし	2.47	3.74	2.29	3.93
case6	1.0×10^{-1}	あり	あり	2.61	3.73	2.61	3.99

表-2に計算ケース, および測点St. 1, St. 2における観測値と計算結果の流速rms差を示す。時間内挿については, 15分毎の観測データを計算ステップ(15秒)毎に線形内挿した。その際, 観測データが2つ以上連続欠測となった場合は, 内挿せずその区間は欠測とした。表-2より, ナッジ係数は 10^{-2} より 10^{-1} のケースの方が, rms差が低減している。時間内挿しない場合は, ナッジ関数を変えても大きな差は見られない。時間内挿をしたケースでは, case0において7cm/s~14cm/sあったrms差が, ナッジ係数 10^{-2} の場合4cm/s~8cm/s, 10^{-1} の場合3cm/s~4cm/s程度に大きく改善されている。

図-4に, St. 1におけるDBFレーダの観測値, およびcase0, case4, case5, case6に対する表層流速の解析結果を時系列で示す。図-4からも, 時間内挿の効果が大きいことがわかる。また, 表-2および図-4から, 空間フィルタをかけた場合に比べ, フィルタをかけない方が若干結果が良いことがわかる。これは, 同化モデルに対して, 観測データの時間頻度が60回に1回と少ないのに対し, 観測データの空間分解能は, モデルの空間解像度400mに対して, 500mとほぼ整合性がとれているため, 空間フィルタの効果が小さく, 時間内挿の効果が大きくなったと考えられる。なお, St. 2の結果も, 同様の傾向であった。

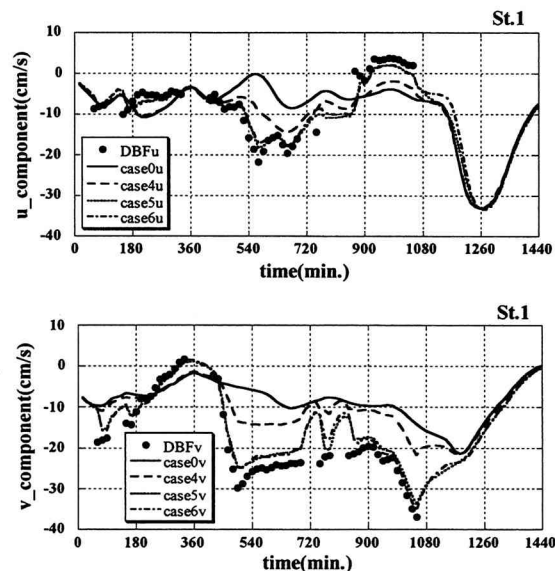


図-4 表層流速の時系列(上:u成分, 下:v成分)

図-5に, case0とcase5に対する表層流速成分のrms差の空間分布を示す。なお, 観測データの取得率が全期間に対して25%以下の領域は, rms差は計算せず空白とした。

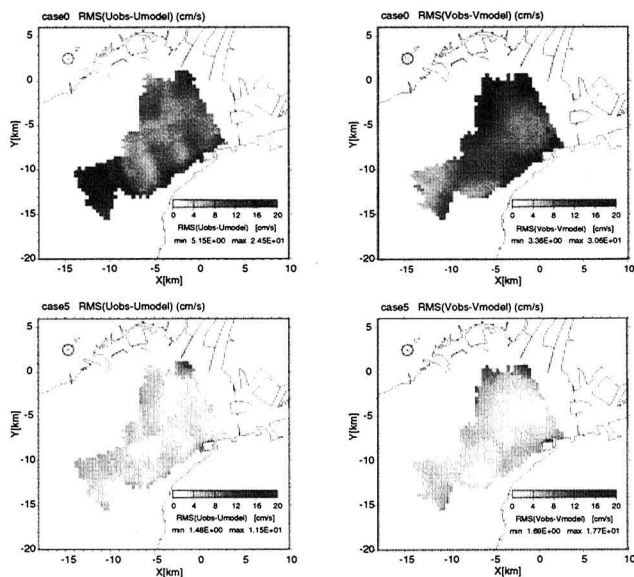


図-5 rms差の空間分布(上:case0, 下:case5)

同化をしないcase0では、領域の縁辺部を中心にrms差が大きく、u成分で最大25cm/s程度、v成分で最大31cm/s程度となっている。一方、case5では、両流速成分ともrms差が大幅に減少しており、木曽三川の河口付近で10cm/sを超える部分があるが、ほぼ全域で4cm/s以下となった。

ナッジング項によるせん断力の大きさを時系列的に調べた結果(図は省略)、観測データが間欠的に欠測となる場合、欠測期間後の同化の際にナッジング項が大きくなった。また、case2とcase5の値を比較した結果、case5は観測値とモデル予測値の整合性が良いため、ナッジング係数が大きいにも拘わらず、せん断力は小さくなった。ナッジング係数の値の妥当性についての評価は難しいが、風応力の大きさはcase2とcase5のせん断力の中間程度となっていたことから、本研究で採用した 10^{-2} と 10^{-1} は妥当な範囲と考えることができる。

(2) 流速の鉛直分布

推定した流速の鉛直構造の妥当性について検証するために、図-1の測点A, B, C, Dで得られた4時刻のADCPによる観測結果と同化結果とを比較した。図-6に、時刻11:15(上げ潮開始時)における測点A, B, C, DのADCPの観測結果とcase0およびcase5の同化結果を示す。

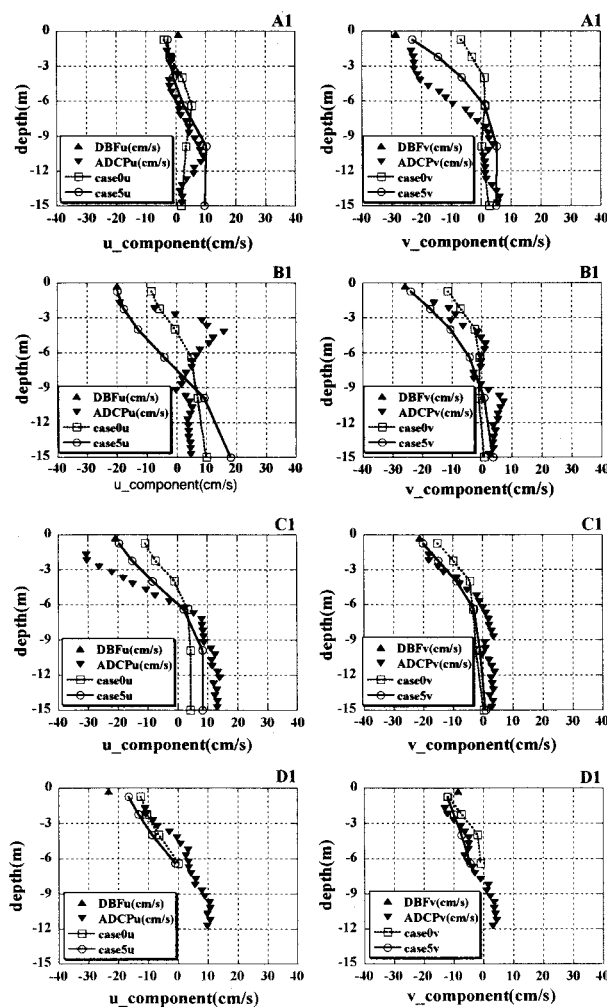


図-6 流速の鉛直分布の推定結果(上から測点A, B, C, D)

西側海域の測点Aについて見ると、u成分の同化結果は、表層から10m層まで観測結果をほぼ再現している。ただし、下層付近のシアは再現できていない。一方、v成分について見ると、第1層から中層にかけて、同化をしない場合に比べて結果が改善されているが、4m付近の躍層は再現できていない。次に、木曽三川前面域の測点Bのu成分の観測結果を見ると、表層付近と4m付近にそれぞれ反対向きのピークを持つS字型の流速分布を示しているが、同化計算結果ではこの傾向を再現できていない。ただし、第1層と第2層については、ほぼ観測結果に一致している。v成分については、モデルの鉛直分解能上、詳細なシア構造は再現できていないが、表層から底層にかけての流速の低減過程はほぼ再現できている。同じく、木曽三川河口部に近い測点Cのu成分について見ると、観測結果において表層から2m層にかけて流速が増加しており、同化結果はこのシアを再現できていない。ただし、3m層から下層にかけての低減傾向はほぼ再現できている。一方、v成分については、測点B同様、同化結果は表層から下層まで鉛直分布を再現できている。最後に、東側海域の測点Dの結果について見ると、計算結果はモデル格子の都合で水深6m付近までしか得られていないが、u成分、v成分とも、同化計算結果は水深2m層から中層にかけての観測結果を良く再現している。ただし、表層近傍のシアの再現性には課題がある。なお、他の3時刻の結果についても、ほぼ同様の結果となった。

以上の結果、河川水の影響が比較的少ないと考えられる測点AとDに関しては、同化計算により観測結果の流速鉛直分布を定性的に再現することがわかった。一方、河口部前面海域に位置する測点B, Cの観測結果に見られた複雑に変化する流速の鉛直構造については、本同化モデルで再現することができなかった。ここで、図-2に示した塩分の横断分布の計算結果を見ると(図は省略)、河川水の影響域が計算結果では東側にずれており、その成層強度も観測結果に比べて弱く、密度場の再現がやや悪い結果となっていた。この原因として、本同化モデルでは、表層付近の現象の複雑さに対して、モデルの空間分解能(特に鉛直分解能)が粗かったことが考えられる。また、密度データを同化に用いず、表層の流速データのみを同化データとしていることや、河川水(河口塩分)の詳細な観測データを境界条件として代入していないことも密度場の再現性が悪い要因と考えられる。このように密度場の再現性が要因となって、河川水影響域を中心に流速の鉛直構造の再現性が悪くなっていると考えられる。これら密度場のモデル化については、今後の課題である。

河口部前面の測点BとCにおけるDBFレーダおよびADCPの観測結果をベクトル表示すると、表層から2m付近までは時計回りの流れ、2m以深については反時計回りに流向が変化している。表層の時計回りの流向変化は、吹送流によるものと考えられ、2m以深の反時計回りの流向変化は、潮流の影響によるものと考えられる。図-7に、時刻16:15

におけるcase0とcase5の第1層(水深0.75m), および第3層(水深4.0m)の水平流速分布を示す。両図より, 第1層については, case5の方が, case0より時計回りの傾向が強い。一方, 第3層では, 両ケースとも木曽三川前面部分において, 反時計回りの傾向は再現できていないが, case5の流動場は, case0の流動場を反時計回りの方向に修正するような結果となっている。以上の結果, 同化計算によって, 流速の3次元流動構造を定性的に改善できる見通しが得られた。なお, case5では, 第5層において西側沿岸部を北上する流れ, 第7層では東側沿岸部を北上する流れが, 同化をしない場合に比べ顕著化しており, 中層から底層にかけて表層の南下流を補うようなエスチュアリー循環が再現されている。

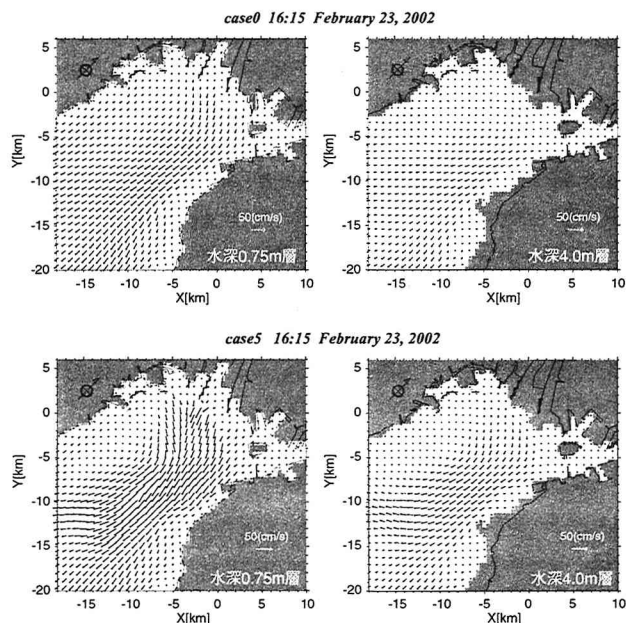


図-7 表層と中層の水平流速分布(上: case0, 下: case5)

5. まとめ

DBFレーダの観測データをナッジングにより同化し, 3次元沿岸流動場の時間変動を推定するデータ同化モデルを構築し, 冬季伊勢湾北部海域の流動計算を実施した。その結果, 表層から水深2m付近の流動場について, 観測結果をほぼ再現できた。また, 河川影響の弱い領域においては, 表層から下層付近までの流速の低減過程を定性的に再現することができた。ただし, 木曽三川河口近くにおいて見られるシアの強い流速鉛直分布については, 再現できなかった。また, 同化計算により, 観測結果で見られた表層から2m付近までは時計回り, 2m以深については反時計回りに流向が変化する傾向が再現された。なお, 同化計算においては, 時間内挿の効果が大きく, ナッジング係数は 10^{-2} に比べ 10^{-1} の方が, 結果が良かった。

以上の結果, DBFレーダのデータとナッジングを組み

合わせた同化モデルにより, 複雑な挙動を示す内湾域の表層流動場の推定精度を改善できることが確認された。現状において, 広域の3次元流動場の時間変化を観測のみによって把握することは不可能なため, 短時間観測が可能なDBFレーダを活用した本同化モデルは, 課題はあるものの, 現象の解明に有効であると考えられる。

謝辞: 伊勢湾におけるDBFレーダの観測に際し, 中部電力(株)の杉山陽一氏に御協力いただいた。DBFレーダの解析においては, (独)通信総合研究所の藤井智史氏, 佐藤健治氏, 松岡建志氏に御協力いただいた。また, 伊勢湾の流動モデルのプログラミングに関して, アーク情報システム(株)の名古屋靖一郎氏に御協力いただいた。ここに関係者の方々に対して, 感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 杉山陽一, 和田明: 冬季における伊勢湾北部海域の環境水温の分布, 海洋調査技術, Vol.14, No.1, pp.19-26, 2002.
- 2) 井口俊夫, 梅原俊彦, 大野裕一: HFレーダによる海流と波浪の観測, 海と空, Vol.66, No.3, pp.191-206, 1990.
- 3) 坂井伸一, 水鳥雅文, 黒岩博司, 灘井章嗣: 2台のHFレーダによる福島沖の流動観測, 水工学論文集, 第38巻, pp.789-794, 1994.
- 4) 坂井伸一, 平口博丸, 松山昌史, 坪野考樹, 森信人, 杉山陽一, 藤井智史, 佐藤健一, 松岡建志: 短時間観測が可能なデジタルビームフォーミング方式による沿岸海洋レーダの開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1511-1515, 2002.
- 5) Lewis, J. K., Shulman, I. and Blumberg, A. F.: Assimilation of Doppler radar current data into numerical ocean models, *Continental Shelf Res.*, Vol.18, pp.541-559, 1998.
- 6) 石塚正秀, 松田真人, 中辻啓二: 海洋レーダによる表層流速データの3次元流動計算への同化に関する研究, 水工学論文集, 第44巻, pp.1167-1172, 2000.
- 7) de Valk, C. F.: Estimation of 3-D current fields near Rhine outflow from HF radar surface current data, *Coastal Eng.*, Vol.37, pp.487-511, 1999.
- 8) Shen, C. Y. and Evans, E.: Surface-to-subsurface velocity projection for shallow water currents, *J. Geophys. Res.*, Vol.106, C4, pp.6973-6984, 2001.
- 9) Cohn, S. E.: An introduction to estimation theory, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.75, pp.257-288, 1997.
- 10) 柳哲雄, 井川周三: 沿岸海域の残差流の診断モデルー周防灘・伊予灘への適用例ー, 沿岸海洋研究ノート, Vol.30, No.1, pp.108-115, 1992.
- 11) 新名古屋火力発電所(7,8号系列) 修正環境影響調査書 環境影響評価書: 中部電力株式会社, 1994.
- 12) 中辻啓二: 大阪湾における残差流系と物質輸送, 水工学シリーズ94-A-9, 土木学会水理委員会, 1994.

(2002. 9. 30受付)