

DBF レーダによる沖ノ瀬環流域の広域流動観測

坂井伸一* ・松山昌史** ・坪野考樹*** ・森 信人****
中辻啓二***** ・西田修三***** ・中池悦朗***** ・谷川陽祐*****

潮流変動の激しい沖ノ瀬環流域において、短時間観測が可能な DBF レーダによる約 1 ヶ月の連続観測を実施した。2 日間、計 27 測点の ADCP によるスポット観測結果との比較から、DBF レーダが流速計と同程度の測定精度を有することを確認した。また、約 2 週間にわたる DBF レーダの連続データを用いて、不明な点の多い同海域の潮流および残差流の水平分布を算出した。得られた流動特性は、従来の知見と整合のあるものであり、DBF レーダの表層流動データを用いることによって、大規模な沖ノ瀬環流を時空間的に詳細に追跡することができ、湾内の物質循環や水質形成機構の解明に寄与できる見通しが得られた。

1. はじめに

海面波のブラッグ散乱機構を利用して、陸上からのリモートセンシングにより海面近傍の流速を検知できる海洋レーダは、沿岸域の環境監視や防災、港湾管理などの分野に有効な観測装置として期待されている。我が国では、1980 年代後半から、通信総合研究所(現 情報通信研究機構)を中心に、HF 帯を用いた海洋レーダの研究が実施されており、その基本性能がほぼ確認されてきた(藤井, 2004)。その中で、従来の海洋レーダは、一定方向の観測を順次切り替えながら面的にスキャンする方式を採用していたため、流動分布を得るために 1 時間～2 時間を要し、またその情報は方向毎に時間的なずれを含む内挿結果であるという課題があった。この問題を解決するため、電力中央研究所では、通信総合研究所との共同研究により、2001 年にデジタル・ビーム・フォーミング方式を採用した VHF 帯の DBF レーダを開発した。これにより、15 分以下の短時間間隔で広域表層流動分布を観測することが可能となった。著者らは、2002 年 2 月に、伊勢湾北部における 8 日間の現地観測を実施し、2 定点の電磁流速計との比較結果から、DBF レーダが流速計と同等の観測精度を有することを確認した(坂井ら, 2002a)。また、同海域において得られた DBF レーダの広域流動データを、ナッジ法によるデータ同化モデルに適用し、ADCP の鉛直流動分布との比較から、3 次元沿岸流動場の再現性について検討した(坂井ら, 2002b)。その結果、河川影響の強い河口前面域の再現性には課題を残すものの、表層から中層にかけての流速場の再現性を改善することができ、時間分解能の高い DBF レーダがデータ同化モデルに対しても有効であることを確認した。

本研究では、DBF レーダの性能についてさらに検証す

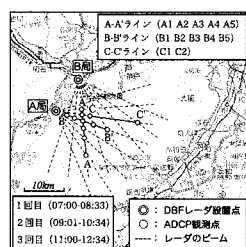
ることを第 1 の目的として、伊勢湾に比べて潮流が非常に速い明石海峡東部の沖ノ瀬環流域において現地観測を実施し、同時に実施した船舶による ADCP のスポット観測結果との比較から、DBF レーダの測定精度を検証する。また、好漁場としても知られる沖ノ瀬環流域の流動現象は、大阪湾の物質循環や水質分布形成に大きな影響を及ぼし、その流動機構に関する研究が実施されているが(例えば、中辻・藤原, 1995; 金ら, 1997)、重要な海上交通路にあたっていることなどから、長期間にわたる流動観測データが少なく、広域的な潮流や残差流の分布については不明な点が多い。湯浅ら(1996)は、HF レーダを用いた 1 ヶ月にわたる 2 時間間隔の流動観測結果から、大潮～小潮間で変動する潮流分布とその残差流機構について検討している。本研究では、第 2 の目的として、DBF レーダによる 15 分間隔の流動分布から、沖ノ瀬環流域の潮流と残差流機構について検討する。

2. 現地観測の概要

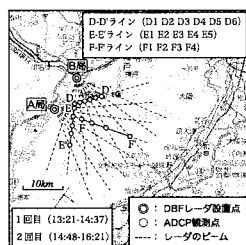
2 台の DBF レーダを国営明石海峡公園整備地内(A 局)と神戸市垂下水処理場内(B 局)に設置し、2003 年 1 月 18 日から 2 月 20 日までの 1 ヶ月間にわたり、図-1 に示す沖ノ瀬環流域の表層流動分布を観測した。ただし、観測期間中、工事に伴う停電などの影響により、片局のレーダを停止する必要があったため、2 局の視線流速データから水平流速分布を算出できた期間は、1 月 18 日 10 時～1 月 31 日 16 時(期間 1)、2 月 4 日 17 時～2 月 8 日 6 時(期間 2)、および 2 月 17 日 13 時～2 月 20 日 9 時(期間 3)となった。

また、DBF レーダによる観測期間中、1 月 31 日と 2 月 17 日の 2 日間、船舶による ADCP のスポット観測を実施した。両日とも 3 隻の船舶を用い、1 月 31 日は 7 時から 13 時にかけて 12 測点 3 潮時(図-1(a))、2 月 17 日は 13 時 30 分から 16 時 30 分にかけて 15 測点 2 潮時(図-1(b))の同期観測データを取得した。ADCP は、600 kHz のワークホースおよびブロードバンドタイプを用い、測定層厚 50 cm 間隔で 15 ping の平均データ(仕様

* 正会員 博(工) (財)電力中央研究所 研究企画グループ
** 正会員 工 修 (財)電力中央研究所 地球工学研究所
*** 正会員 工 修 (財)電力中央研究所 環境科学研究所
**** 正会員 博(工) 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻
***** 正会員 工 博 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻
***** 修(工) 近畿技術コンサルタンツ株式会社
***** 正会員 兵庫県 福岡土木事務所



(a) 1月31日



(b) 2月17日

図-1 観測範囲と測点位置

上の標準偏差2.3 cm/s)を取得した。また、併せてクロロテックを用いた水温、塩分観測を実施した。さらに、1月31日に関しては、広域の水温分布を見るため、Terra搭載のASTER/TIR画像を解析した。

本研究では、ADCPによる同期観測を実施した両日の観測結果を中心に、DBFレーダの測定精度について検討する。また、約2週間の連続データを取得できた期間1の観測データを用いて、同海域の流動構造について考察する。

3. 観測結果

(1) 電波受信状況

DBFレーダによる観測データの解析方法については、坂井ら(2002a)に詳しいので、詳細は省略するが、最終的に各局約12分の観測データを時間内挿することによって(ただし、各局8方向の受信ビーム間の同時性を満たす)、15分毎に500m間隔の直交格子上の流速分布を算出した。A局は、前面が断崖になっており、見晴らしが良く、観測期間を通じて常に良好なデータを取得できた。一方、B局は、前面に格子鉄柵や電柱、および防波堤などの港湾構造物があり、ややノイズが大きい受信環境であった。

図-2に、B局で見られた特徴的な距離方向の視線流速分布パターンを示す。図からわかるように、レンジ18(沖合9km付近)において、流速パターンが不連続になっている。ドップラー・スペクトル上でこの傾向を見ていくと、沿岸近傍域では1つであった1次散乱ピーク

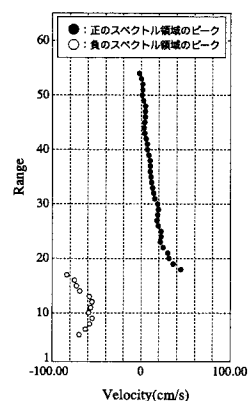


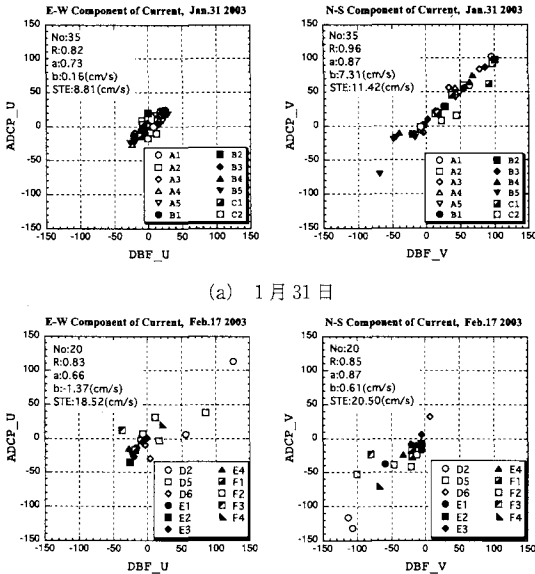
図-2 急変する流速ピークの例(B局)

に対して、徐々に離れた位置に別の1次散乱ピークが出現し、距離レンジの変化に伴って、近傍域に存在した1次散乱ピークが次第に小さくなり、もう一方は逆に大きくなりながら連続的に変化していた。この点から判断すると、両者の1次散乱は、船舶や自然界からの電波干渉によるノイズとは考えにくく、いずれも海域流動場の信号と考えられる。このように不連続に流れ場が切り替わる要因として、サブグリッドスケールの渦や水平せん断流による影響が考えられるが、そのメカニズムについてはまだ不明な点が多く、現在その解明へ向けて研究が進められている(灘井, 2004)。本研究では、このような2つの1次散乱ピークが共存する場合の扱いに関しては、正負のスペクトル領域の整合性を見ながら、エネルギーレベルの大きい方を採用することとした。

(2) DBFレーダの流速測定精度

図-3(a), (b)に、1月31日と2月17日に実施したADCPの観測データとDBFレーダによる観測データの比較を示す。図-1(b)のD1, D3, D4, E5に関しては、B局の電波に対するノイズ成分が多く、今回の解析対象からは除外した。1月31日については、観測開始時には2m/s程度の北西風であったが(船上観測による)、観測終了時には西風8m/s程度の強風となっていた。一方、2月17日は、観測開始前までは3m/s程度の北風であったが、徐々に2m/s程度の南風へと変化し、終日微風状態であった。また、両日も大潮にあたっていたが、日潮不等が大きく、1月31日は潮位差30cm程度(満潮～干潮)、2月17日は潮位差60cm程度(干潮～上げ潮)と潮位変化は小さかった。

図-3より、1月31日に関しては、東西成分のレンジが60 cm/s程度であるのに対し、南北成分が150 cm/s程度と卓越している。両データは、総データ数35に対して、相関係数Rと標準誤差STEが、東西成分が0.82と8.8 cm/s、南北成分が0.96と11.4 cm/sであり、両成分



(a) 1月31日

(b) 2月17日

図-3 DBF レーダと ADCP の流速値の比較

ともよい対応を示している。VHF 帯を用いる DBF レーダの測定水深は約 0.3 m (Stewart・Joy, 1974) であり、ADCP の測定水深 1.54 m との違いによる影響で、回帰直線の傾き a は、やや 1 より小さくなっていると推定できる。一方、2月17日の結果について見ると、東西、南北成分とも流速のレンジは 150 cm/s 程度あり、データ数 20 に対して、相関係数と標準誤差は、東西成分が 0.83~18.5 cm/s、南北成分が 0.85~20.5 cm/s となっている。1月31日に比べてややばらつきが大きくなっているが、相関は高く両者はよい対応を示している。

1月31日に関しては、測点位置によって違いが生じる交差角の影響はほとんど見られない。図-1(a)より、測点 A5, B5, C2 は、共にレーダの交差角が小さい領域に位置しているが、A5 と B5 に関しては、他の測点と同様の結果となっている。C2 に関しては、他のデータ群よりやや離れているが、後述するように、この地点は潮流楕円の長軸方向に対して両局からの視線ビーム方向がほぼ直角方向となっているため、流速ベクトルの推定誤差がやや大きくなっているものと考えられる。2月17日については、D2, D5, D6 のばらつきが目立つが、これは D-D' ラインが、明石海峡部の前面で流速変動が非常に大きい場所であるため、DBF レーダのデータを 15 分毎に時間内挿する際の誤差が影響していると考えられる。

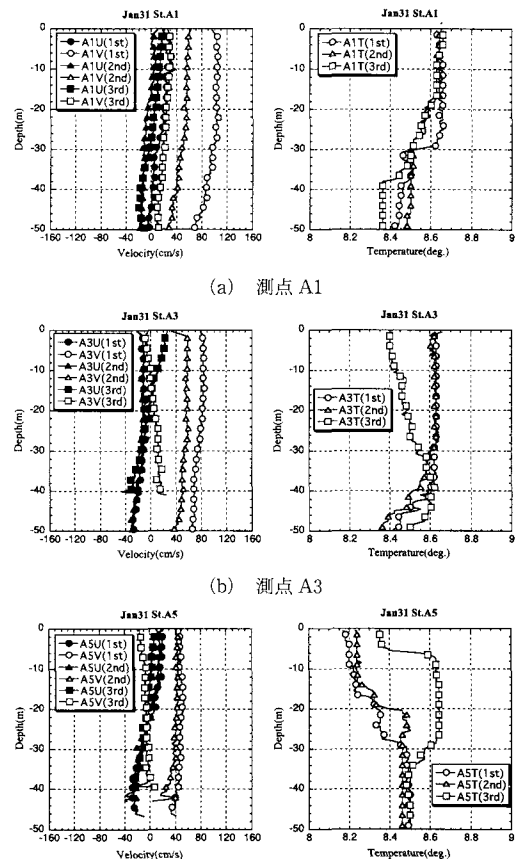
(3) 流速・水温・塩分の鉛直分布

図-4(a)~(c)に、DBF レーダ、ADCP、およびクロロテックより求めた A1, A3, A5 の流速と水温の鉛直分布を示す。観測時間は、1月31日の第1回~第3回

を示しており、満潮から干潮にかけての様子を捉えている。なお、塩分は、測点および潮時にかかわらずほぼ一定値 (33.1) であった。これより、流速は、潮位によって変動が激しいが、水温は A5 などでは若干の変動はあるものの、その変動幅は小さいことがわかる。測点的には、A1, A3, A5 の順に沖ノ瀬環流の中心に向かうほど上層部の水温が小さくなっており、卓越する南北流速成分も同様に沖ノ瀬環流の中心部ほど小さくなっている。

(4) 広域水温分布

上記で述べた水温に関して、広域の水平分布を見るために、1月31日の10時45分に同海域上空を通過した ASTER/TIR の熱赤外画像を解析した。飛来時刻は、2回目と3回目のスポット観測の間にあたっている。ASTER は米国 NASA により 1999 年 12 月に打ち上げられた地球観測衛星 Terra 搭載の国産センサーである。TIR の特徴として、空間分解能 90 m という高性能に加え、5つの熱赤外バンドを持っていることにより、単バンドの LANDSAT/TM などでは不可能であった重回帰分析による高度な大気補正を行えるという点が挙げられ



(a) 測点 A1

(b) 測点 A3

(c) 測点 A5

図-4 流速(左図)・水温(右図)の鉛直分布変動

る(松永ら, 2002). 図-5にレベル1Bプロダクトの解析結果を示す. 図中, 大阪湾は左上部に位置しており, 海岸線を太線, スポット観測点を白抜きの○で併記している. また, 白塗りの○は, 図-4で示した3つの測定点である. 画像はCCT値で示しており, 白いほど高く, 黒いほど低い. 観測点付近に東西に伸びている帯状の部分は雲である. 画像より, 湾南部で紀淡海峡から流入したと考えられる高温水塊, 沖ノ瀬環流の中心付近と考えられるA3やA5付近で低温部が見られるが, その他の海域ではあまり温度差がないことがわかる.

○で示した測定点に, △で示したMT局および独自に実施した測点のデータを加え, 雲の影響の少ない9測点の実測水温とASTER/TIRのCCT値との重回帰分析結果を図-6に示す. これより, 今回の対象測点においては, 水温のダイナミックレンジが小さいものの, 数点の実測データを入手できれば, 重回帰分析によって, 水温の絶対値分布を高精度で推定できる見通しが得られた.

(5) 広域流動特性

a) 調和解析結果

図-7(a), (b)に, 期間1のDBFレーダの観測データから最小二乗法によって求めた主要分潮であるM₂と

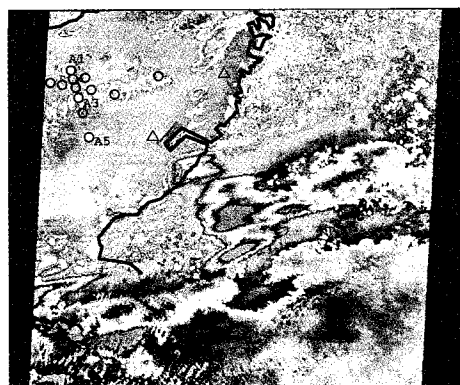


図-5 ASTER/TIR 画像による広域水温分布

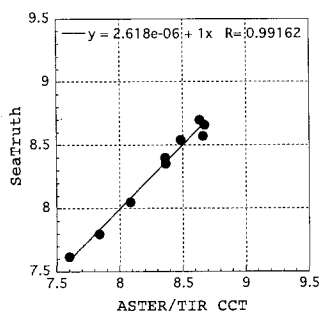
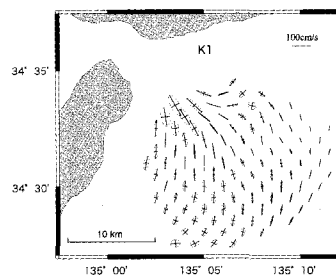


図-6 ASTER/TIR データと実測データによる重回帰

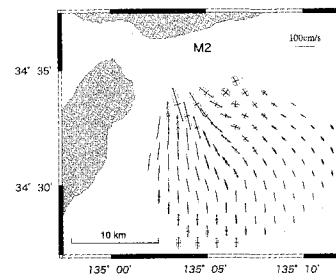
K₁の潮流楕円の空間分布を示す. 本海域で支配的なM₂分潮に関しては, 山根(1998)に明石海峡東部, 淡路島近傍, 湾中央の3測点における海上観測結果が掲載されている. その結果と図-8の結果を比較すると, DBFレーダから求めた潮流楕円の方がやや大きくなる傾向にあったが, 軸方向および両軸のアスペクト比は定性的によく一致した. DBFレーダの結果の方が大きくなる傾向については, 観測期間や測器の測定層が違うことなどが要因と考えられる. 図-7より, 下げ潮時に明石海峡から南東方向に卓越するジェット状の流れ(藤原ら, 1989)に沿って, 両分潮の長軸が大きくなっている. なお, 岩屋および神戸の潮位変動に対して, 本海域の潮流は約4時間遅れて位相が変化していた. また, 明石海峡の西流最強時には, 湾中央の南東方向のジェット流は見られず, 湯浅ら(1996)によるHFレーダの観測結果と同様の結果となった.

b) 残差流

図-8(a), (b)に, 大潮時(1月19日)と小潮時(1月25日)における1日平均残差流を示す. なお, 図中のコンターは水深を示しており, また見やすいようにベクトルは間引いて示した. 大潮時の日平均残差流は, 東経135°04'12"北緯34°32'24"付近を中心とした半径6 km, 最大流速60 cm/s程度の時計回りの沖ノ瀬環流が示されている. 一方, 小潮時の沖ノ瀬環流は, 東経135°03'40"北緯34°31'40"付近へとその中心を南西方向へ移し, 半径5 km, 最大流速40 cm/s程度の環流となっている. 小潮の



(a) M₂分潮



(b) K₁分潮

図-7 DBFレーダの観測データから求めた潮流分布

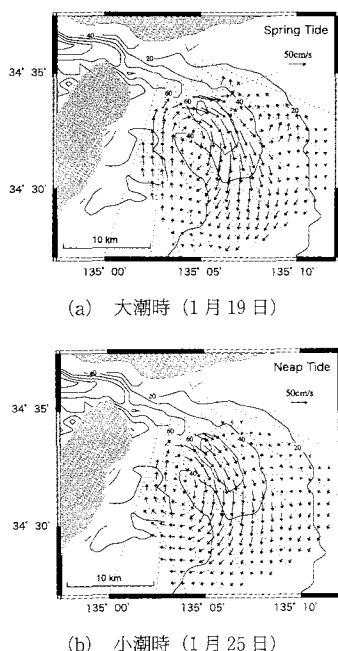


図-8 DBF レーダの観測データから求めた残差流分布

流速値は、湯浅ら (1996) の HF レーダによる結果よりも大きくなっている。なお、大潮時には、沖ノ瀬環流の北側と東側に 2 つの低気圧性の渦が存在していることがわかる。これらの渦は、中辻ら (1995) が数値シミュレーションで示しているように明石海峡東流最強時に KH 不安定によって発生したものと考えられる。東側の渦については、水深 20 m の浅瀬に沿っている。水深 20 m の等値線に沿っては、潮汐フロントが存在することが知られており (中辻・藤原, 1995), 両者の関係が示唆される。また、このような沖ノ瀬環流領域の流動データを、データ同化手法などによって数値モデルにフィードバックすることにより、沖ノ瀬の形成機構の解明が進むと期待できる。

4. ま と め

沖ノ瀬環流域において、DBF レーダによる観測を実施

し、ADCP による観測データとの比較から、潮流変動が激しい海域においても、時間分解能の高い DBF レーダは精度良く流速変動を観測できることを確認した。また、DBF レーダの広範囲かつ連続した観測データを用いることにより、海上観測が困難な海域においても潮流や残差流を観測することができ、湾内の物質循環や水質形成機構の解明に資することを示した。

謝辞： 本研究を実施するにあたり、DBF レーダの設置に関しては、国土交通省近畿地方整備局国営明石海峡公園事務所の松本勝正氏、ならびに神戸市建設局下水道河川部計画課係長の岩橋吾哉氏にご協力いただいた。また、ASTER のデータ処理に関しては、資源・環境観測解析センターの前川勝利氏のご協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 金 種仁・中辻啓二・村岡浩爾 (1997): 大阪湾の沖ノ瀬の形成機構と残差流系の関連性, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 406-410.
- 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 (2002a): 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.
- 坂井伸一・平口博丸・松山昌史・坪野考樹・森 信人 (2002b): DBF 海洋レーダを用いたデータ同化手法による 3 次元沿岸流動解析の試み, 水工学論文集, 第 47 巻, pp. 1309-1314.
- 中辻啓二・藤原建紀 (1995): 大阪湾におけるエスチュアリー循環機構, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 396-400.
- 灘井章嗣 (2004): 私信.
- 藤井智史 (2004): 海洋レーダの技術と歴史, 沿岸海洋研究, Vol. 41, pp. 73-82.
- 藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫 (1989): 大阪湾の恒流と潮流・渦, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 209-213.
- 松永恒雄・植木俊明・納谷美也子・立川哲史 (2002): 東京湾の現場水温データを用いた ASTER 水温アルゴリズムの検証, 日本リモートセンシング学会第 33 回学術講演会論文集, pp. 191-192.
- 山根伸之 (1998): 大阪湾の流動構造と生態系を考慮した水質予測モデルに関する研究, 大阪大学博士論文, 185 p.
- 湯浅一郎・高橋 暁・宝田盛康・灘井章嗣 (1996): 大阪湾における循環流・潮汐フロントの変動構造, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 436-440.
- Stewart, R. H. and J. W. Joy (1974): HF radio measurements of surface currents, Deep-Sea Res., Vol. 21, pp. 1039-1049.