

DBF 海洋レーダを用いた大阪湾における流動・フロントの観測

坪野考樹* ・ 森 信人** ・ 松山昌史*** ・ 坂井伸一**** ・ 西田修三*****
清水隆夫***** ・ 中辻啓二*****

DBF 海洋レーダを適用することにより, 大阪湾奥部における表層流況について観測を実施し, 湾奥部の詳細な潮流および表層流況を算出した。また, 時・空間的に豊富な流速結果を利用することにより空間-時間断面を検討した結果, 流速のフロントが特定でき, フロントが観測された期間および伝播速度を把握することが可能となった。そしてフロントに伴う浮遊物の挙動について考察を実施し, 集積領域について検討を行った。

1. はじめに

坂井ら (2002) により, デジタルビームフォーミング方式 (DBF) を採用した VHF 帯の DBF 海洋レーダの開発が行われ, DBF 海洋レーダにより約 20 km 四方の表層流動分布を 15 分という短時間で連続観測できることが示された。さらに, DBF 海洋レーダを大阪湾の沖の瀬還流域の流動に適用および検討した結果により, 坂井ら (2004) は, DBF 海洋レーダが高い時間分解能で精度よく流速変動を観測できること, および DBF 海洋レーダが時間変化する潮流変動の把握において有効であることを示した。また, 中辻ら (2004) は, DBF 海洋レーダのデータを用いて浮遊物の解析を実施しており, 流況把握だけでなく浮遊物の解析においても, 時間空間分解能に優れた DBF レーダが有効であることを示した。

本論文では, 大阪湾奥部における時間・空間的に詳細な潮流および流況について把握することを目的として, 坂井らが開発した DBF 海洋レーダを大阪湾に適用し, 時間・空間方向で詳細に得られた流速データを用いて解析を実施する。そして大阪湾内の潮流分布を把握するとともに, 解析期間中に出現したフロントの特定およびその伝播について検討を行う。最後に, 流速のフロントにより浮遊物が集積される過程について考察を行う。

2. 現地観測の概要

2 台の DBF 海洋レーダを 7 km はなれた 2 地点 (夢洲: A 局, および堺: B 地点) に 2003 年 10 月 18 日 ~ 12 月 17 日の約 2 ヶ月間にわたり設置し, 図-1 に示す大阪湾奥部の流動観測を実施した。図-2 に観測期間中の神戸における潮位グラフ (気象庁・潮汐観測) を示す。

本研究で用いた DBF 海洋レーダは, 8 組の受信アン

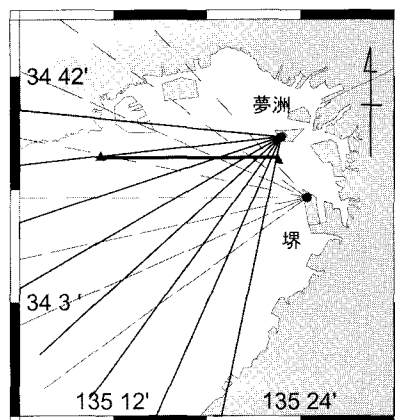


図-1 DBF レーダの観測海域

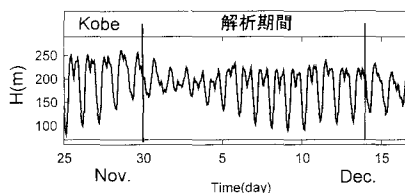


図-2 解析期間中の神戸港の潮位

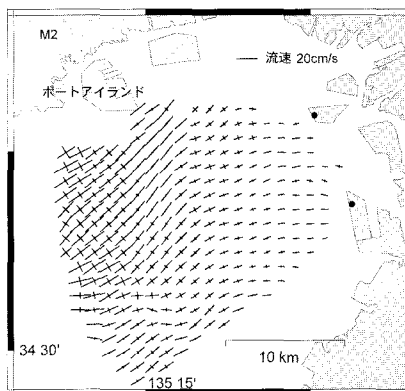


図-3 M2分潮の潮流分布

* 正会員 博(工) (財)電力中央研究所 環境科学研究所
** 正会員 博(工) 大阪市立大学講師大学院工学研究科
*** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 地球工学研究所
**** 正会員 博(工) (財)電力中央研究所 研究企画グループ
***** 正会員 工博 大阪大学助教授大学院工学研究科都市系専攻
***** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 環境科学研究所
***** 正会員 工博 大阪大学教授大学院工学研究科都市系専攻

テナで同時受信した信号を処理することにより、特定方向の受信ビームを生成することができ、特定の8方向の流速を示す信号を観測できる。そして、A,B局で交互に15分間隔で繰り返し観測することにより、時間間隔15分で約20 km 四方、500 m 間隔の格子点における表層流動を観測できる。

ただし、レーダにより直接得られる信号はビーム方向の流速に変換する必要がある、また変換された流速データがビーム方向の流速であること、そして時間・空間方向に疎らに存在することから、格子点ごとの流速値を内挿により算出する必要がある。そのため、本研究では、坂井ら（2002）の解析方法により11月30日から12月14日のデータについて解析を行い、この解析期間における15分間隔、500 m 格子間隔の結果を用いて、潮汐流動およびフロントの検討を行った。

3. 観測結果

(1) 潮汐流動

解析期間中、ある時刻・あるビーム方向におけるレーダの受信信号が微弱となることがあり、観測時刻・位置によっては流速が算定できない格子が出現する。そのため、15日間の観測データのうち7日以上流速データがある格子点における主要4分潮の潮流楕円を最小二乗法を用いて算出した。

図-3にM2分潮の潮流成分を示す。この図より、今回使用したDBFレーダにより、15日間で7日間以上のデータが取得できた領域は、レーダ設置点より約3～20 kmの範囲であることが分かる。

大阪湾内のM2分潮成分は、長軸方向の流速が、大阪湾奥部において約5 cm/s、ポートアイランド沖において約15 cm/sと、湾奥から沖合いにかけて大きくなり、潮流楕円の形状が、湾奥部と比較して沖合いの領域において円形に近づく結果となった。ただし、潮流楕円の形状は、A, B局の設置位置が近く、沖合いの領域ではA, B局のビームの方向が近くなるためにビームの方向と直角方向の流速の算出精度が悪くなると考えられることから、湾奥部と比較して沖合いの領域の精度は低い可能性がある。この沖合いの領域を含めた大阪湾全域の潮流楕円の形状を把握するためには、坂井ら（2004）での別の地点にレーダを設置した結果を利用するなどの工夫が必要と考えられる。

(2) 大阪湾奥部表層における流速の不連続領域

大阪湾奥部の表層流況を把握するために、解析期間中のデータについて図-4のような表層流況図を作成した。その結果、流速の不連続となる領域（以下フロントと記述する）が観測された。このフロントは、大阪湾の湾奥部から放射状の形状をもち、12月9日の15時では湾奥部

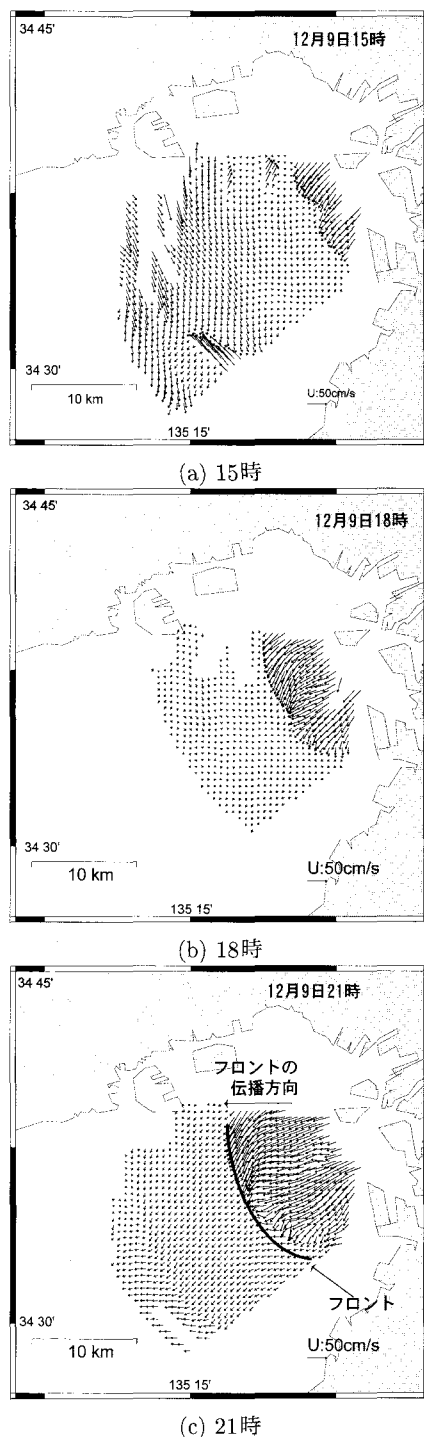


図-4 大阪湾表層の流況（12月9日）

に位置していたが、18時、21時と時間がたつにつれて湾奥部から沖合いに放射状に伝播していた。

4. 解析および考察

(1) フロントの解析

図-4 の大阪湾北側陸境界付近において、流動のフロントは岸を右手にみる方向 (図-4(c) の矢印の方向) に伝播している。このフロントの伝播について詳しく検討するために、図-1 中のライン X-Y における、東西流速 U の東西・時間断面について検討を実施した。その結果、流動のフロントが、解析期間15日間中、期間1 (12月3日4~10時)、期間2 (12月3日18時~4日0時)、期間3 (12月9日15時~10日3時) の計三回で観測された。

図-5 および図-6 に、期間1, 2 をふくむ12月3日0時~12月4日06時までの、および期間3 をふくむ12月9日12時~12月10日08時までに於ける東西流速 U の東西・時間断面図を示す。図中の縦軸は時間を示し、横軸が X-Y 軸の距離を示している。ただし、東西流速 U は、東向きを正とする。

東西流速 U は、どの期間についてもコンター間隔が密となる位置が存在し、期間2 では流速が小さいがおおむね X 側 (西側) で正、Y 側 (東側) で負となる。特に、期間3 において東西流速の不連続性が最も大きくなっていた。また、東西流速が不連続となるフロントは、時間がたつにつれて図中の矢印の方向に東から西側に伝播しており、期間1, 2 において約23 cm/s、期間3 において約25 cm/s で西向きに伝播していた。

図-4 をみると、フロントに沿って南向きの流れが観測されており、南北流速 V についても、東西流速と同様に東西・時間断面について検討を実施した。図-7 にフロントが最も顕著に現れた期間3 における南北流速 V の東西・時間断面図を示す。ただし、南北流速 V は北向きを正とする。

流速 V は、流速 U のフロントの位置でコンターの間隔が密となる領域があり、その領域の東側で南向きの流れとなっており、南流最大の位置も流速 U のフロントと同様の速度で西側に伝播していた。これは、X-Y 断面における東西流速 U が収束する領域において、北側が陸地境界であることから東西から収束してきた水が行き場をなくしたために、流速 V が南向きとなり、東西流速の収束域の伝播とともに、南流最大の位置も西に伝播したと考えられる。

(2) 伝播速度

中辻ら (2004) は、2003年12月3日に本海域において水質を計測しており、湾奥部では表層約1 m に低塩分水が存在したと報告している。さらに、塩分の鉛直断面図から、表層の水深 $H1 = 3$ m までの塩分が30、下層での塩分が32、図-1 のライン X-Y の全水深 H が約20

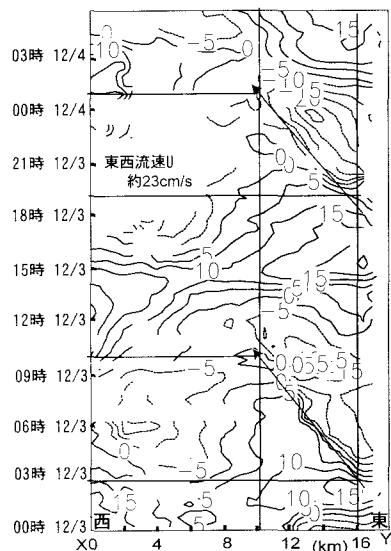


図-5 東西流速 U の東西・時間断面 (期間1, 2: 12月3-4日)

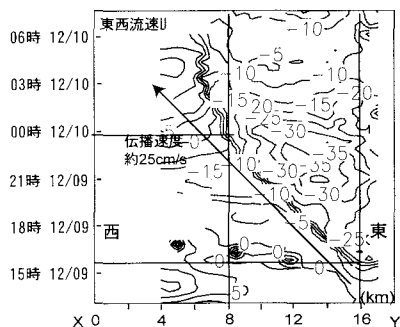


図-6 東西流速 U の東西・時間断面 (期間3: 12月9-10日)

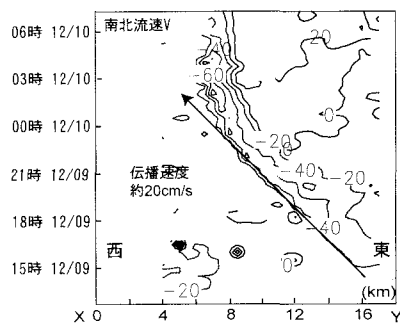


図-7 南北流速 V の東西・時間断面 (期間3: 12月9-10日)

mであることが分かる。また、第5管区のWEBによる速報によると2003年12月の海水温が17度であったことから、密度 ρ は約1023 kg m⁻³、密度差 $\Delta\rho$ 約1.5 kg m⁻³ となる

これら密度・水深などの値を、以下の内部重力波の位相速度 C の式

$$C = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g \frac{H1 \times (H - H1)}{H}} \dots\dots\dots (1)$$

に代入すると約20 cm/s となり、前節で示した流速 U 、 V のフロントの伝播速度とほぼ一致する。このことから、期間1（12月3日）で観測された大阪湾奥部の流速フロントは、淡水影響による内部重力波として伝播したと考えられ、期間2、期間3のフロントの伝播についても、期間1と同様に内部重力波として伝播したと考えられる。以上の結果から、今回観測された流速フロントの発生原因は、大阪湾奥部にある淀川の出水が影響したものと示唆される。ただし、この期間1、2、3において、まとまった降雨が観測されておらず、しかも淀川の流量の情報が入手出来なかったことから、フロントの発生原因を特定することが出来なかった。しかし、フロントの原因が特定できると、フロントの発生、規模について検討が可能になることから、淀川流量との関係については今後の課題と考えられる。

（3）渦度によるフロントの特定

図-7によると、南流の最大値の位置は、12月9日まで西進していたが、12月10日0時以降において西進せずにX-Yラインの8kmの位置で留まり、この位置で60 cm/sと非常に大きな流れが観測された。

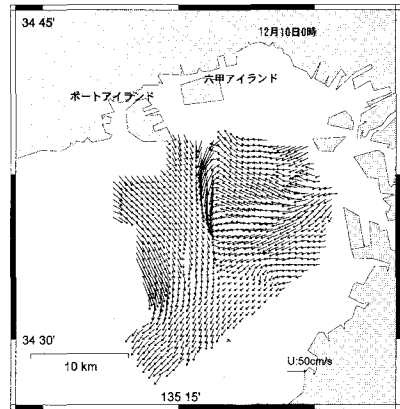
図-8に、12月10日の0時、3時における大阪湾の表層での流況図を示す。図-4で示されたフロントは、12月9日まで放射状に発達していたが、12月10日以降になると六甲アイランド沖で停滞する様子が観測された。そして、南向きの大きな流速は、フロントのある六甲沖で観測され、X-Y断面のある岸付近だけでなく、南側約10 kmまで到達し、ジェットのような形状で分布していた。

図-9に、期間1における12月3日10時での大阪湾の表層流況を示す。期間1のフロントは、期間3に比較して流速が小さく、六甲アイランドの手前に位置しているが、期間3と同様に南向きの流速が南北に伸びたジェットのような形状で分布していた。

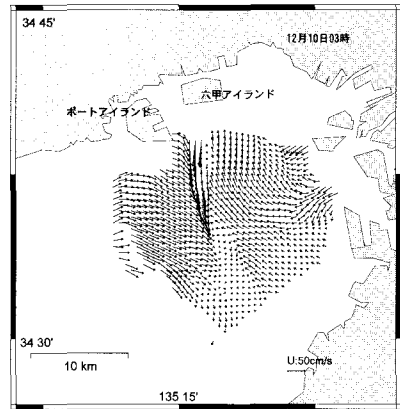
図-8、図-9の南向きの流速がジェット状の形状を示す特徴を考慮して、徳田ら（1999）、村嶋ら（2001）や中辻ら（2004）が実施したように、流速場から渦度を計算して、東西時間断面図を作成した。

図-10に、渦度のX-Yラインにおける東西時間断面図を示す。渦度は、ジェットのような形状を示す南流れを挟んで東側で正、西側で負となっており、渦度が正負の領域で挟まれた渦度0の位置がフロントの位置であることが分かる。さらに、このフロントの時間に伴う渦度の正負で挟まれた領域の移動は、流速結果（図-6、図-7）と比較して明瞭な結果となった。

誤差が見込まれる流速データに渦度の計算を適用する



(a) 0時



(b) 3時

図-8 図-4以降の流況（12月10日）

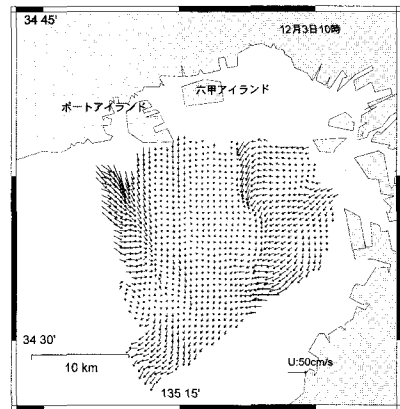


図-9 期間1の流況（12月3日10時）

場合、微分を行うことから誤差が拡大する可能性があるが、今回の結果ではフロントの位置を明瞭に特定できた。この結果は、フロントにおいて流速が左右から収束してジェット状の形状を示すことから、フロントの東西領域

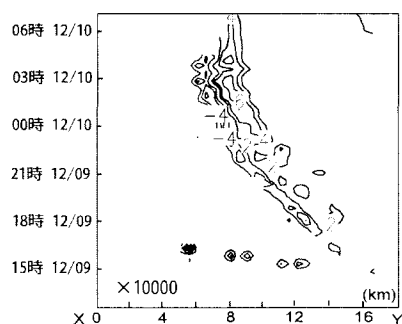


図-10 温度の東西・時間断面 (期間3: 12月9-10日)

で正負の温度が算出されたためと考えられる。以上のことから、本海域で観測されたフロントのように、フロントで収束した水が陸境界などの影響により一方向に流れだした場合は、温度によるフロントの特定が可能になると考えられる。

(4) 海面における浮遊物の挙動

期間 1, 2, 3 の東西流速 U の東西・時間断面図 (図-5 および 図-6) をみると、フロントの周辺領域において東西流速 U は東西から収束していることが分かる。さらに、フロントの東側における流速は、伝播速度と同じ方向の西向きとなるが、伝播速度よりも大きくなっている。以上の結果より、浮遊物が海域に均等にある場合では、このフロント領域に浮遊物が集積すると考えられる。

期間 3 の南北流速 V の東西・時間断面図 (図-7) を見ると、フロントの位置で南向き流れとなっていることから、フロント周辺の流速の収束域に集積する浮遊物は、西進しながら南方向に運ばれると予想される。

以上の結果および図-4, 図-8 の結果により、表層の浮遊物は、期間 3 のようなフロントが発達すると、フロントの東西から集積しながらフロントの伝播速度で西側に移動し、南向きの流れにより南方向に運ばれ、最終的に図-8 の南流れ最大の位置で南北で一様に分布すると予測される。

5. ま と め

大阪湾の湾奥部において DBF 海洋レーダを適用する

ことにより、時間および空間方向に詳細な流速情報を取得でき、この流速情報により湾奥部の詳細な潮流楕円を記述できた。そして、時・空間的に豊富な流速結果から空間時間断面を記述することにより、流速のフロントを特定でき、このフロントの領域を追跡することが出来た。さらに、これらフロントの周辺領域における流速結果から、フロントが東側から西側に伝播すると、海面における浮遊物はフロント周辺領域に集積し、この集積領域は南北方向に分布することが示唆され、フロントの挙動が浮遊物の収束に影響を与えたと考えられる。

以上の結果により、フロントの挙動・位置把握において、時空間方向に高い分解能を持つ DBF レーダが有効なツールとなると考えられる。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、大阪大学水システム工学研究室の金漢九様、高地慶様および宮本豊尚様、大阪市港湾局ならびに大阪府環境農林水産部にはレーダ設置においてご協力していただきました。また、京都大学防災研究所の山口弘誠様ならびに (株) 電力計算センターの三枝健一様にはレーダのデータ解析においてご協力していただきました。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 気象庁・潮汐観測資料 (近畿地方): www.data.kishou.go.jp/marine/tide/genbo/g_kinki.php, 2005/5/10
- 神戸港の水温: www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN5/kaisyo/sokuheid.htm, 2005/5/10
- 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 (2002): 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・松山昌史・坪野考樹・森信人・中辻哲二・西田修三・中池悦郎・谷川陽裕 (2004): DBF レーダによる沖ノ瀬還流域の広域流動観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1416-1420.
- 徳田正幸・寺内潔・村崎定男・村嶋陽一・金津伸好 (1999): VHF 海洋レーダの表層流観測による潮目挙動の解析, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1346-1350.
- 中辻哲二・西田修三・清水隆夫・坂井伸一・松山昌史・坪野考樹・森信人 (2004): 浮遊物の挙動予測に向けた海洋レーダの適用性評価, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1436-1440.
- 村嶋陽一・徳田正幸・福田幸司・茂崎慎治・大利桂子・藤良太郎 (2001): VHF 海洋レーダを用いた潮目予測への適用可能性の検討, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1451-1455.