

VHF 海洋レーダによる表層流動の観測と ADCPによる検証

FIELD SURVEY OF NEAR-SURFACE FLOW USING VHF RADAR AND COMPARISON WITH ADCP MEASUREMENTS

中辻啓二¹・石塚正秀²・徳田正幸³・村上和男⁴・藤原建紀⁵

Keiji NAKATSUJI, Masahide ISHIZUKA, Masayuki TOKUDA, Kazuo MURAKAMI and Tateki FUJIWARA

¹正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²学生会員 工修 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

³正会員 理博 国際航業(株) 技術研究センター (〒191-0065 東京都日野市旭が丘3-6-1)

⁴正会員 工博 運輸省特別研究官 港湾技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁵正会員 農博 京都大学大学院助教授 農学研究科応用生物科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Since ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) has been widely used in estuarine and coastal waters, barotropic or baroclinic features can be clarified accompanied with three-dimensional computation. Newly-developed VHF (Very High-Frequency) Radar is based on the fact that VHF Radar sea-echo on the sea surface makes resonant Bragg scatter and is possible to provide spatial distribution of near surface velocity in about 30 cm depth from sea surface. In the present study, VHF radar measurements were carried out in order to compare with ADCP results in the head of Osaka Bay. As a result, reasonable agreements were found.

Key Words : VHF Radar, ADCP, Field survey, Near-surface current, Residual current, Wind-driving force

1. はじめに

1980年代後半からのADCP(超音波ドップラー流速計)の導入は、沿岸海洋観測において画期的な出来事であり、鉛直方向の流速成分を含む3次元流動場の理解に多大な貢献を果たした。なかでも、Fujiwara et al.¹⁾による大阪湾の代表的な残差流である沖ノ瀬環流の実測は有名である。また、このような観測機器の発達と時を同じくした計算機、ワークステーションの急速な発展により、3次元流動の数値計算が可能となった。そして、観測結果と計算結果の情報の補間により沿岸域の流動構造・物質輸送機構の解明が大きく進展した(中辻ら²⁾、³⁾。

このように、新しい観測機器の開発によってこれまでに得ることのできなかった現象が発見され、さらに定量的に把握できる。最近では、海洋レーダが沿岸域において利用されはじめている(湯浅ら⁴⁾、徳田ら⁵⁾)。これは陸上にアンテナを設置し、水表面近傍の流動を広域的に、かつ連続的に計測することができる流速計である。また、ドップラスペクトルの形状から波浪や風向に関する情報

も得ることができる。

海洋レーダはもともと周波数域がHF(High-Frequency)帯にあることからHFレーダと呼ばれてきた。米国や英国では1960年代から海洋レーダの研究が進められており、近年においても活発な研究が行われている⁶⁾。日本におけるHFレーダを用いた計測は、1989年頃から始められ(井口ら⁷⁾)、これはADCPが沿岸域で利用され始めた時期とほぼ同じ頃である。しかし、HFレーダはビーム波の周波数がVHF(Very High-Frequency)レーダと比較して低いため、アンテナの長さが大きく、また、空間分解能も低いことから、日本の沿岸域での計測には不向きといえる。そこで、HF帯よりも高周波を有するVHF帯を使用したVHFレーダが新しく開発された。

VHFレーダは、船舶航行、油・ゴミの拡散などの表層の現象を知る方法として、また、モニタリングを含めた現地データの蓄積に役立つと考えられ、今後の利用が期待される。そのために、まず、VHFレーダの精度評価を行う必要がある。しかし、海面近くの流れ現象は複雑であり、また、従来まで用いられてきた様々な流速計では海表面近傍の流速を計測することが困難であったた

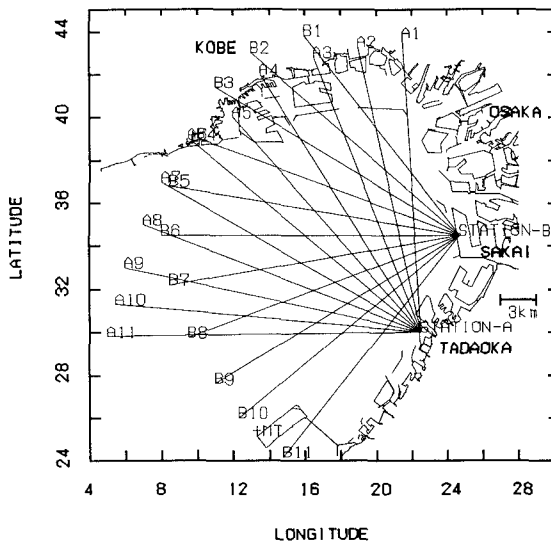


図-1 VHF海洋レーダの観測海域
(1997年8月12日～9月9日実施)

めに未解明な部分が多い。VHFレーダの使用に際しては十分な検討が行われるべきであると考えられる。

そこで、本論文では大阪湾湾奥部においてVHF海洋レーダを用いた流動計測を行い、ADCPとの比較・検証を行う。これまでの研究では設置型の流速計とレーダとの比較は行われているが、ADCPとの比較はまだ行われていない。ADCPの利点は観測船に搭載して移動観測することにより、空間的な流速分布を得られることである。つぎに、海域の流動特性を含めた表層流れと風の関係について考察を行う。

2. 観測の内容

(1) VHF海洋レーダ観測

図-1にVHF海洋レーダの観測海域を示す。今回の実測では大阪湾湾奥部を対象とした。アンテナのA局を泉北郡忠岡町、B局を堺市にそれぞれ設置した。レーダによる観測範囲はビーム視線方向には約20kmであり、アジマス(ビームに対して垂直)方向には湾奥部全域をほぼ含むことができるようにアンテナの振り幅を約90°とした。観測期間は1997年8月12日～9月9日である。ただし、途中に欠測のない連続的なデータの取得期間は、8月19日～9月8日の21日間であった。

つぎに、VHFレーダの計測原理の概要について説明する。陸上に設置されたアンテナから送信されるレーダ波は海面に対してほぼ水平に入射するため、一般的に水面におけるレーダ波の後方散乱は弱いと考えられる。しかし、レーダ波の入射する波長がある特定の波長を持った波浪(水面波)に次のような関係で入射した場合、後方散乱が強くなることが知られている(Crombie⁸⁾)、(図-2)。

$$\lambda = 2\lambda_w \cos \theta \approx 2\lambda_w \dots\dots\dots (1)$$

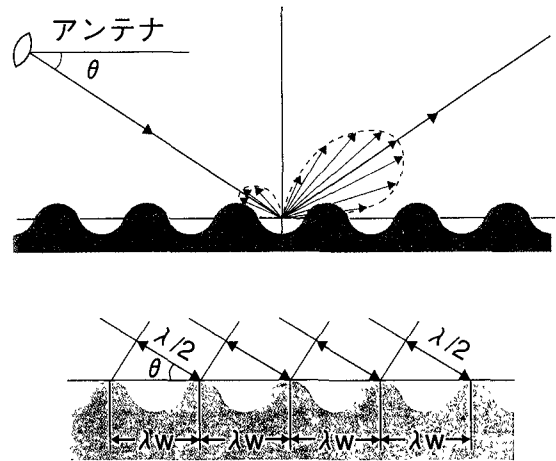


図-2 レーダ波と波浪成分波のブラッグ共鳴散乱

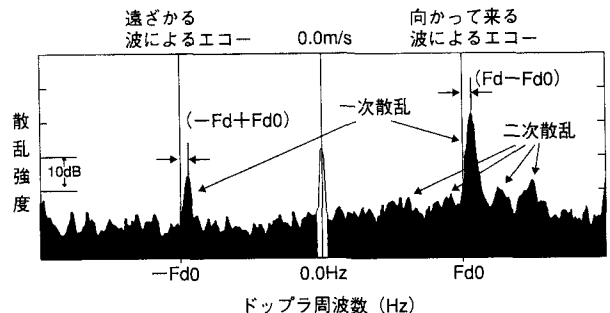


図-3 ドップラスペクトルの特徴

ここで、 λ はレーダ波の波長(7.16m)、 λ_w は波浪の波長、 θ (≈ 0)はレーダ波の入射角である。この関係はブラッグ(Bragg)共鳴散乱とよばれる。このブラッグ共鳴散乱機構を利用したBarriek理論⁹⁾に基づいてレーダ観測が行われる。

ここで、式(1)の条件を満たすような波浪の波速からドップラ周波数を求めると、この場合、0.66 Hz($=Fd_0$)となる。このドップラ周波数は海域の流れがない場合の値であり、実際に計測される周波数($=Fd$)には若干のずれが生じている。このずれ分($Fd - Fd_0$)が海域の流れ、つまり、表層流速となる(図-3 参照)。

レーダの計測水深については、Stewart and Joy¹⁰⁾が詳述している。彼らは水表面付近の流れの鉛直分布を指数関数分布と仮定して、共鳴する波浪の波長との関係を求めた。今回用いたVHFレーダの場合、レーダ波と共鳴する波浪の波長が約3.5mであるので、計測水深は約30cmまでとなる。

(2) ADCP・クロロテック観測

観測海域を図-4に示す。ADCPによる観測は神戸沖から忠岡沖を結ぶ観測線A、クロロテックによる観測は観測線A、B、Cで行われた。ADCP観測は観測点(A1～A7)で停泊して測定を行い、測点と測点の間はA

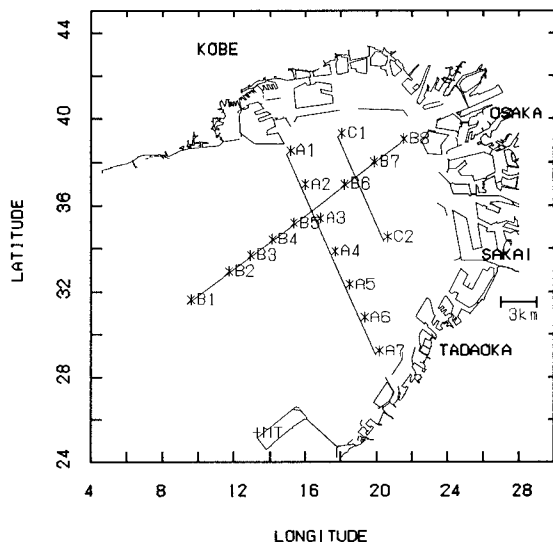


図-4 ADCP・クロロレックの観測海域
(1987年8月23日実施)

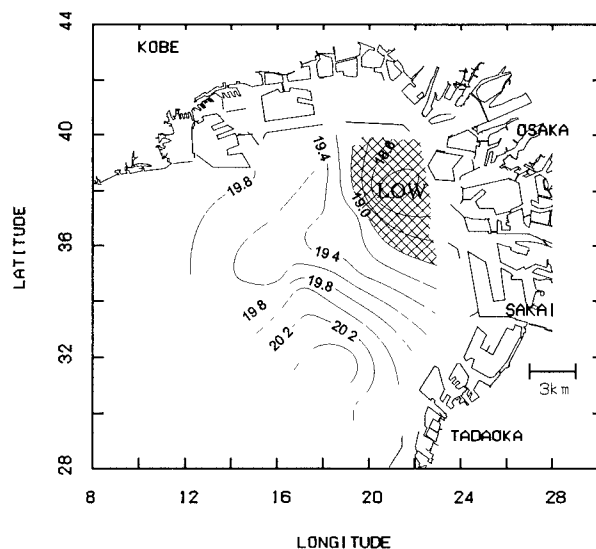


図-6 表層における密度(σ_t)の水平分布,
1997年8月23日8:51~14:54

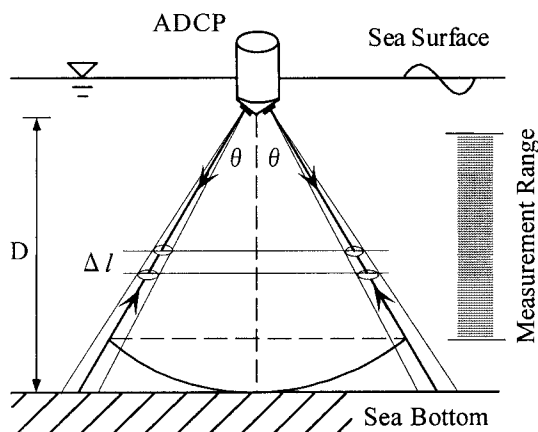


図-5 ADCPによる計測の模式図

DCPを引き上げて移動した。1断面の計測には、約1.5時間を要し、合計8断面のデータを得た。観測日はVHFレーダの観測期間中の1997年8月23日である。

つぎに、ADCPの計測原理について説明する。ADCPは海中にパルス状の超音波を送信し、送信音波と反射音波の周波数の差から、ADCPと反射物との相対的な速度を求める。この流速から海底面に対する船の対地速度を減ずることにより海水の流速が計測できる。

最近では、様々な種類のADCPが開発され、その用途に応じて一長一短がある。また、ADCPの種類や設定によってその計測精度が変化する。今回、使用したADCPは、RD Instruments社製の600kHz、対地速度計測可能な4本ビーム($\theta=20^\circ$)のブロードバンドADCPである。図-5にADCPから発信されるビームの模式図を示す。この図から分かるように、観測点の水深に対して約94%($\approx D \cdot \cos \theta$)の深さまでしか計測を行うことができない。また、表層付近においても送受波器から一定の距離の範囲は計測できない。これはADCPの設定や設置水深による違いが大きい。今回の実測では水深1.4mが最も表層に近かった。

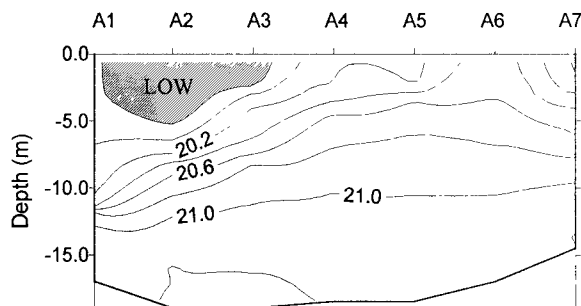


図-7 観測線Aにおける密度(σ_t)の鉛直分布,
1997年8月23日16:35~18:03

ADCPによる流速の水平成分の標準偏差(誤差) σ_H (cm/s)は、4本ビームのブロードバンドADCPの場合では、次のようになる¹¹⁾。

$$\sigma_H(V) = \frac{1.5V_a}{\pi\sqrt{N}} \left[\frac{(R^2 - 1)2C \cos \theta}{F_0 D} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V_a (cm/s)は曖昧速度(ambiguity velocity)、 F_0 (Hz)はADCPの周波数、 R はwater modeに対応する値、 C (cm/s)は音速、 θ ($^\circ$)はビーム角度、 D (cm)は層厚、 N は計測データの平均化回数である。したがって、 $V_a=160$ 、 $F_0=600,000$ 、 $R=0.8$ (water mode 4)、 $C=151,900$ 、 $\theta=20$ 、 $D=50$ 、 $N=20$ とすると $\sigma_H=1.2$ cm/sとなる。

(3) 関空MT局における気象・海象の連続観測

関西国際空港近くの海上観測塔MT局(北緯:34°25.18′、東経:135°13.09′、図-1中に記載)では、風、潮流、波浪、水温などの海象・気象データが1時間毎に連続観測されている¹²⁾。ADCP観測を行った8月23日の西日本地域は太平洋高気圧(1006 hpa)に覆われ¹³⁾、日平均気温は27.3°C(最高:28.6°C(16時)、最低:26.5°C(5時))、日平均湿度は80%であった。日平均風速は3.7m/s、日平均風向は南西であった。また、8月19日~9月8日

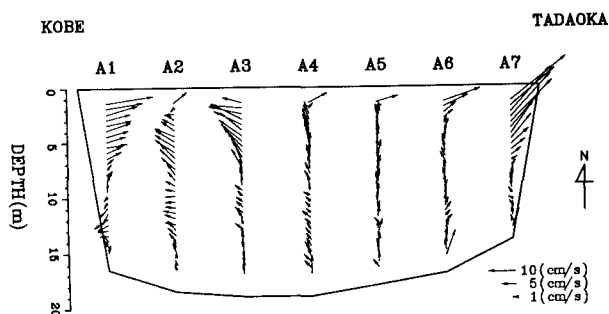


図-8 観測線Aにおける残差流の鉛直分布、
1997年8月23日6:00~18:00

の平均風速は3.8m/s、卓越していた風向は西南西であった。本論文では水深3m、9mの流速データと海上16mでの風データを用いて考察を行った。

3. 観測結果

(1) ADCP・クロロテック観測

a) 密度分布

図-6, 7 は塩分と水温から算出した密度(σ_t)の水面分布(8:51~14:54)と観測線Aにおける断面分布(16:35~18:03)を示す。1997年8月7日~9月2日の期間は降水がなく¹⁴⁾、大阪湾湾奥部での成層度は例年と比べて著しく低下している。その結果、20m水深に沿って発達する潮汐フロントは湾奥側に少し移動している。観測線Aはフロント内の鉛直構造を把握し、エスチュアリー循環による栄養塩フラックスを定量的に評価する目的で設定したが、思惑とは少し違った。観測時のフロントは湾奥方向に少し窪んだ形をなしている。密度の低いA1, A2, A3では成層化した断面をとらえており、上層の水深は約10mである。この海域の上層水は主として淀川から流入した河川水が西宮沖循環により運ばれてきた河川からの流入水である。

一方、A4~A6では高密度の水塊がほぼ鉛直様に混合している。つまり、観測点A4~A6は潮汐フロント外に存在していることを示している。また、A7の上層に低塩分の水塊があり、A7はフロント内に存在している。この傾向は図-7の鉛直断面分布に明瞭に表れている。

b) 残差流分布

図-8は残差流の鉛直分布(上向:北流, 右向:東流)を示す。鉛直方向には50cm間隔で計測が行われた。先述したように、観測線Aが特異な場所であったため、残差流構造は複雑になっている。ここでは、密度分布(図-7参照)の影響によると思われる残差流の変化が見られる。したがって、A1~A3海域とA4~A7海域とに分けて考えると理解しやすい。フロント内部に位置するA1,

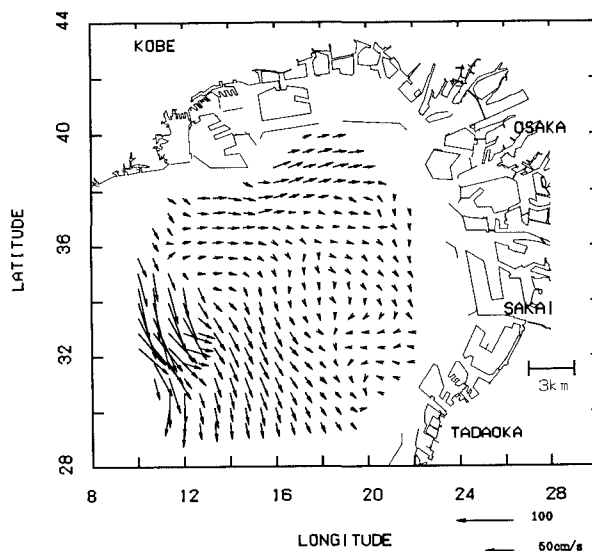


図-9 VHFレーダによる表層(水深約30cm)における流動場、
1997年8月23日18:00(明石海峡東流最大後)

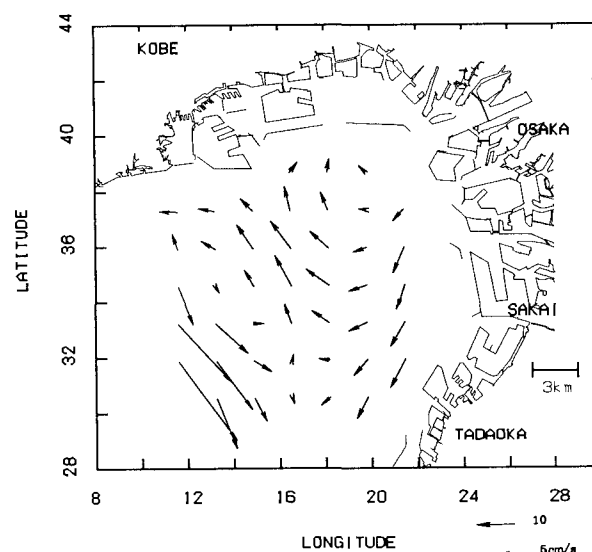


図-10 VHFレーダによる表層(水深約30cm)における残差流、
1997年8月19日~9月8日(21日間平均)

A2, A3の上層では低密度の河川水が拡がっており、高気圧性循環に伴う時計回りの循環の影響を受けてA3では北西向き、A1では東向の流れが観測されている。一方、A4~A6海域ではほぼ北流となっている。ただし、表層付近の流れは北東流である。

今回の観測では、密度分布の変化により観測断面Aにおけるエスチュアリー循環を捉えることができなかった。

(2) VHFレーダ観測

図-9は8月23日18:00の大阪湾湾奥部の水面下約30cmの流動場を示す。この図は観測で得られたデータを時空間的に補間した結果である。時間に関しては毎正時の値、空間に関しては500m間隔の正方形格子上に補間した。補間の詳細は徳田ら⁵⁾に詳しい。図中の左下に見られる流速50cm/s以上の大きい流れは、明石海峡東流最大時に

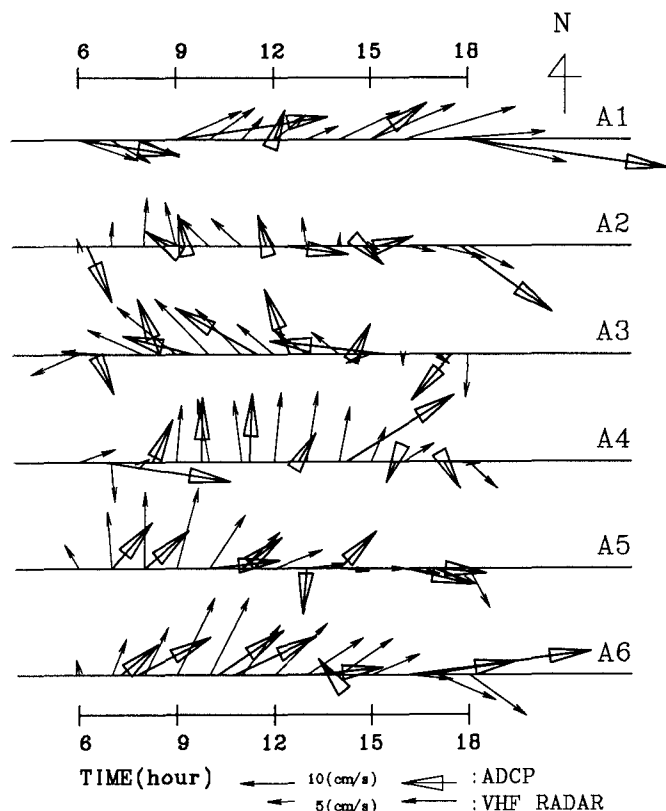


図-11 VHFレーダとADCPによる各測点の
表層における流動ベクトルの時系列変化の比較、
1997年8月23日6:00~18:00

大阪湾側へ流入する水塊の一部である。その流動がVHFレーダによって明瞭に観測されている。また、神戸港沖では東向きの流れ、大阪側ではほぼ南向きの流れとなっており、基本的な明石海峡東流時の流況といえる。

図-10はVHFレーダから得られた残差流(21日間)の分布を示す。この結果は既往の現地観測(例えば、樋端ら¹⁵⁾)や3次元パロクリニック流動計算²⁾で示された残差流分布とよく一致している。湾奥部では密度成層とコリオリ力の影響を受けた高気圧性渦による時計周りの循環が見られる。また、図左下側の海域における南東方向の強い残差流は、図-9にも見られる沖ノ瀬を中心とした沖ノ瀬環流の一部であると考えられる。

4. VHFレーダとADCPによる流れの検証

(1) 時間毎の流動変化

図-11はVHFレーダとADCPにより得られた8月23日における表層流動の時系列分布の比較を示す。ADCPの値は表層に最も近い水深1.4mの観測値である。この図を見るとVHF海洋レーダとADCPとの結果は、方向変化に対する追従性も良く、全体的にはほぼ一致しているといえる。ただし、流速の絶対値はADCPの方が約6 cm/s程度大きい。これは計測器の誤差、観測時の誤差、観測する物理量の違いによる誤差、レーダ観測の

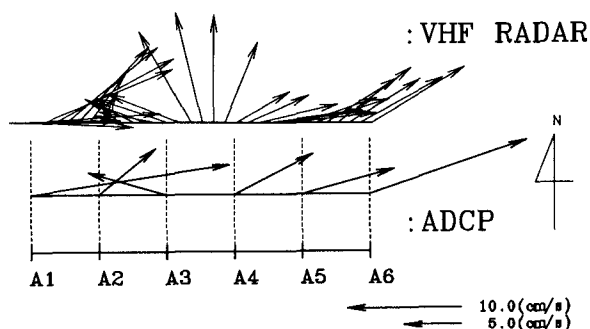


図-12 VHFレーダとADCPによる表層における
残差流ベクトルの比較、
1997年8月23日6:00~18:00(12時間平均)

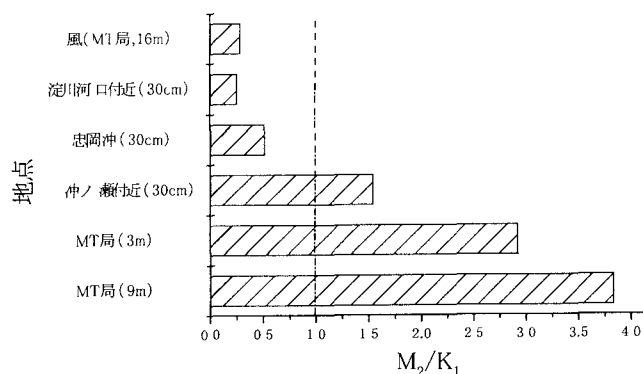


図-13 K_1 周期と M_2 周期の卓越度、
1997年8月19日~9月8日(21日間平均)

時空間的な誤差などによると考えられ、現時点において、この原因は明らかでない。

(2) 残差流の比較

図-12はVHFレーダとADCPによる残差流を示す。ここで残差流はADCP観測の行われた期間(12時間)の調和解析によって得られた結果である。したがって、半日周潮流成分しか除去されておらず、残差流成分の中には海陸風による吹送流の影響が含まれていることに注意しなくてはならない。両者はよく一致している。図-8では、表層のベクトルが特異にみえるが、表層流動を観測するVHFレーダの結果も同じような分布を示すことから、両者が表層流動を正しく計測できていることが分かる。また、表層ベクトルの向きと風向が一致しており、表層流れは風の影響を強く受けているといえる。

A3とA4で大きく流向が変化している原因は、図-7に示したフロントがこの間に位置しているためであり、A3に見られる北西方向の残差流はフロントに沿った流れ(図-6, 10 参照)と考えられる。

(3) 長期的な流れの特性

ここでは、大阪湾湾奥部において長期的に風が与える流れへの影響を調べるために、VHFレーダの観測期間中(21日間)の風と流れの卓越周期を求め、それぞれの運動の特性を考察する。

a) 風が流れに及ぼす影響

関空MT局の風のスペクトル解析を行った結果、1日周期の変動が卓越しており、観測期間中は海陸風が発達していたといえる。この変動は15日間のデータを用いた調和解析で得られる K_1 周期成分（厳密には S_1 周期）に対応する。また、関空MT局で計測されている潮流の調和解析を行うと、水深3 m、9 mではともに M_2 周期（12.42時間）の潮流が卓越しており、これまでに知られている知見と同様に、大阪湾において半日周潮流が卓越していることが分かる。したがって、観測データの得られた水深3 m、9 m層では長期的（ここでは21日間）に見た流れに対する風の影響は小さいと考えられる。

b) 表層流れと風の関係

湾奥部の各海域における K_1 周期と M_2 周期の流れがどの程度卓越しているのかを調べるため、MT局の水深3 m、9 mの流れ、VHFレーダによる沖ノ瀬付近、淀川河口付近、忠岡沖の表層流れに対して、 K_1 、 M_2 周期の潮流楕円長軸振幅の比(M_2/K_1)を比較した結果を図-13に示す。また、MT局の風に対しても卓越周期を比較する。図中の点線は、 $M_2/K_1=1$ を表し、1より大きい場合は半日周潮の流動が卓越しているといえる。流れの早い沖ノ瀬付近では、 M_2 潮流が大きくなっている。一方、流れの遅い湾奥部の淀川河口付近やMT局北側のA6付近では K_1 周期が卓越しており、これらの海域の表層流れは1日周期の海陸風による吹送流の影響を受けていると考えられる。

以上のことから、それぞれの海域における潮流の強さ（海域特性）によって、風による吹送流の影響も変化すると考えられる。ただし、風の変動は一定ではなく、また、潮流は大潮小潮のように変化するため、表層流動と風の変動との議論は、今後さらに、検討する必要があるであろう。

4. まとめ

今回、VHFレーダとADCPによる流れ分布の比較・検証を行い、ほぼ一致した結果を得た。ただし、流速や流向が異なっていた点も見られ、さらに検討を行う必要があると考えられる。また、風と表層流れの関係を卓越周期の比較により明らかにした。

VHFレーダは水深約30 cmまでの流速を計測するが、海面近傍の流動は大気からの熱フラックスや海上風からの運動量フラックスの伝達、潮流、河川水の流入など複雑な構造となっており、海上における観測値との比較には様々な要因が含まれることに注意しなくてはならない。

今回示した結果には時空間的な線形補間による誤差も含まれる。時間的には各ビーム毎に毎正時の値を得るために前後1時間の値を比例配分している。また、レーダの交差する順番によって補間する流速の時間的な相違が

生じる。一方、空間的には、レーダの各ビームで囲まれる面積が広がる海域では補間精度は低下し、また、二局のビームの視線方向の交差角度が小さい場合には、ビームに対して直角方向の流れは計測することができない。補間方法の良し悪しは今後の課題といえる。

謝辞：ADCP、クロロテックを用いた現地観測には、大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻水工研究室、京都大学大学院農学研究科海洋生物環境研究室の学生諸君の協力を得た。また、VHF海洋レーダによる現地観測には、日本下水道局事業団、大阪府産業廃棄物処理公社の協力を得た。また、(財)日本気象協会には海象・気象観測データを快く提供していただいた。記して感謝を述べたい。

参考文献

- 1) Fujiwara, T., Nakata, H. and Nakatsuji, K.: Tidal-jet and vortex-pair driving of the residual circulation in a tidal estuary, *Continental Shelf Research*, 14, pp.1025-1038, 1994.
 - 2) 中辻啓二、藤原建紀: 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, Vol. 42, pp. 396-400, 1995.
 - 3) 中辻啓二、石塚正秀、金種仁: 大阪湾の流れと密度場の鉛直構造, 海と空, Vol. 73, No. 2, pp. 41-48, 1997.
 - 4) 湯浅一郎、高橋暁、宝田盛康、灘井章嗣: 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, Vol. 43, pp. 436-440, 1996.
 - 5) 徳田正幸、村上和男、渥美泰彦、永松宏: VHF沿岸海洋レーダの開発と流れ観測, 海岸工学論文集, Vol. 44, pp. 1276-1280, 1997.
 - 6) The Oceanography society: *Oceanography*, Vol. 10, No. 2, pp. 34-95, 1997.
 - 7) 井口俊夫、梅原俊彦、大野裕一、野崎憲朗: 短波海洋レーダによる海流及び波浪の観測, 通信総合研究所季報, Vol. 35 No. 176, pp. 387-397, 1989.
 - 8) Crombie, D. D.: Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s, *Nature*, 175, pp.681-682, 1955.
 - 9) Barrick, D. E.: Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra, *Radio Science*, Vol. 12, No. 3, pp.415-424, 1977.
 - 10) Stewart, R. H. and J.W. Joy: HF radio measurements of surface currents, *Deep-sea Research*, Vol. 21, pp.1039-1049, 1974.
 - 11) RD Instruments, Ltd.: Field service technical paper 001 - broadband ADCP advanced principles of operation, pp.1-15, 1996.
 - 12) 気象庁: 関西国際空港MT局観測資料, 8・9月, 1997.
 - 13) 気象庁: 気象要覧, 8月, 1997.
 - 14) 大阪管区气象台: 地上気象観測月統計値, 8・9月, 1997.
 - 15) 樋端保夫ら: 潮流制御による瀬戸内海環境保全に関する研究, 中国工業技術試験所報告, 第8号, pp. 8, 1991.
- (1998. 9. 30受付)