

DBF 海洋レーダーによる大阪湾奥部の流況観測と波浪解析への応用

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

大阪湾奥部において DBF 海洋レーダーを用いた流況観測を実施し、収集されたデータを基にレーダーの特性を明らかにするとともに、沿岸域の表層流動構造に及ぼす出水や風の影響について解析を行った。また、台風時の観測データを用いて、レーダーによる波浪情報の推定についても、その適用性を検討した。その結果、日スケールの流況には出水や風の影響が現れるが、15日間の残差流には、吹送流の影響はほとんど見られなかった。また、台風接近時のレーダーのスペクトルデータを用いて海上風や波高の推定を行ったところ良好な結果が得られた。しかし、風速 5 m/s 以下では S/N 比の低下により波浪情報の抽出は困難となり、20 m/s 以上では計測レンジの低減が生じることが明らかとなった。

1. はじめに

DBF 海洋レーダーは、約 25 km 四方の広域な表層流速場を時空間補間により 500 m 間隔の格子上に 15 分間隔に捉えることができる海洋レーダーである (坂井ら, 2002)。昨年度、このレーダーの精度検証と浮遊物の挙動予測への適用性に関する現地実験を大阪湾において実施し、良好な結果が得られた (中辻ら, 2004)。しかし、洪水時の河口流や強風時の吹送流に対するレーダーの計測特性については、十分なデータの収集と評価・検討はなされていない。そこで、本研究では昨年度に引き続き大阪湾奥部において観測を実施し、収集された出水時や強風時のデータを基に、レーダーの性能評価を行うとともに、沿岸域の表層流動構造に及ぼす出水や風の影響について解析を行う。また、台風時の計測データを用いて、レーダーによる波浪情報の推定についても、その適用性を検討する。

2. 現地観測

レーダー観測は 2003 年 10 月 18 日～12 月 17 日および 2004 年 10 月 8 日～12 月 20 日に大阪湾奥部で実施した。いずれの観測もレーダーサイトを大阪湾奥部の約 7 km 離れた 2 地点 (夢洲 A 局と堺 B 局: 図-1) に設置し、視線方向約 25 km、走査角約 90°で計測を行った。2004 年の観測では A 局に気象計を設置し、10 分間隔の風速風向と日射量のデータ収集も行った。また、観測海域に ADCP と塩分計を設置し、流況と塩分の定点連続観測も実施した。得られたデータを基に、(1) 残差流、(2) 出水時、(3) 強風時、(4) 台風時、の流況解析を行い、湾奥部の表層流動に及ぼす出水と風の影響を明らかにするとともに、台風 23 号が来襲した 2004 年 10 月 20 日のデータを用いて、レーダーの計測性能と波浪解析への適用性について検討を行った。

3. 観測結果

(1) 平均流速場

観測された代表的な日平均流速分布を図-2 に示す。日平均風速が 3.1 m/s の微風で、かつ降雨も 5 日間観測されなかった時の結果である。閉鎖性が強い流れは弱い、おおむね南～西の流れを示している。

図-3 は 2003 年 12 月 2 日～16 日の 15 日平均した残差流を示している。大和川の河口付近で 10 cm/s を超える流れが見られるものの、概ね 5 cm/s 程度の低流速を示している。大阪湾奥部の特徴的な流況として知られている東岸恒流帯 (藤原ら, 1989) も認められる。また、湾奥から湾口に向かうエスチュアリー循環流や観測域西域では沖の瀬環流の影響も見られる。沖の瀬環流の観測結果 (坂井ら, 2004) と同様に、これまで面的に捉えることができなかった残差流構造が、DBF レーダーによって捉えられていることがわかる。

(2) 出水時の流況

出水が確認された 2003 年 11 月 30 日 17:15 の流況を図-4

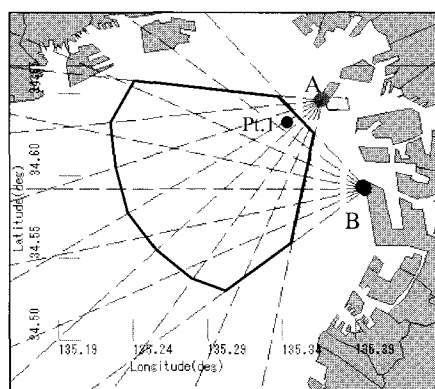


図-1 大阪湾奥部レーダー観測海域

* 正会員	工博	大阪大学大学院助教授	地球総合工学専攻
** フェロー	工博	大阪大学大学院教授	地球総合工学専攻
*** 学生会員		大阪大学大学院	地球総合工学専攻
**** 正会員	工修	(財)電力中央研究所	我孫子研究所
***** 正会員	博(工)	(財)電力中央研究所	研究企画部

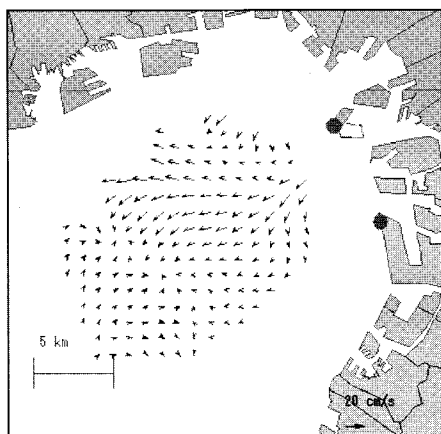


図-2 日平均流速分布 (2003/12/6)

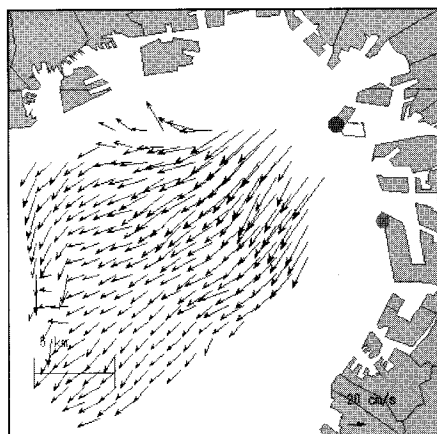


図-4 出水時の流速分布 (2003/11/30 17:15)

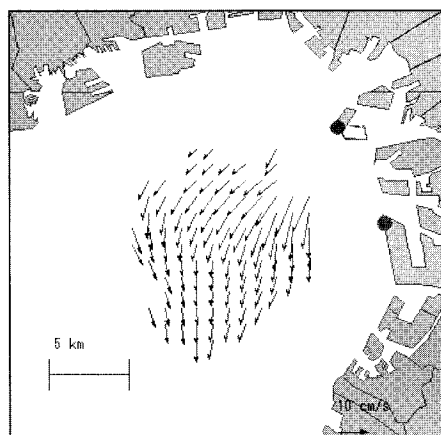


図-3 15日間平均流速分布 (2003/12/2~12/16)

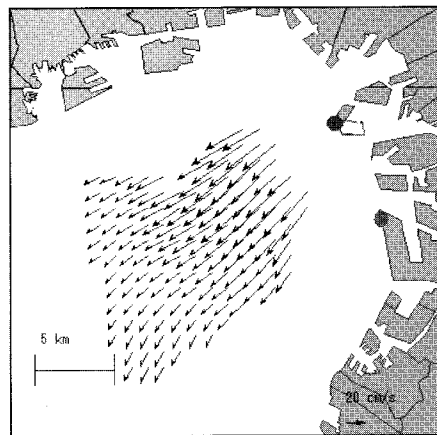


図-5 出水時の日平均流速分布 (2003/11/30)

に、またその日の日平均流速を図-5に示す。この日の淀川の日平均流量（河口上流約25 km 枚方観測所）は約 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ に達し比較的大きな出水であった。その結果、淀川や大和川の河口付近において、 50 cm/s を超える流速が認められ、日平均でも 40 cm/s を超える流速が現れている。これは湾奥部における平水時の日平均流速が最大でも 20 cm/s 程度であったことを考えると、出水の影響が顕著に現れていることがわかる。流向は南西方向を示し、ほぼ一様化している。ちなみに、この時は北寄りの風が吹いていたが、最大風速が 4.5 m/s と小さかったため、吹送流はそれほど発達せず、河口流が卓越した流速場となっている。

(3) 強風時の流況

図-6は、最大風速が 8.4 m/s 、平均風速も 5 m/s を超える強い西風が吹いていた2003年12月7日の流況を示したものである。一日を通して西寄りの風で、風向が安定しており、吹送流が十分に発達していたと考えられる。

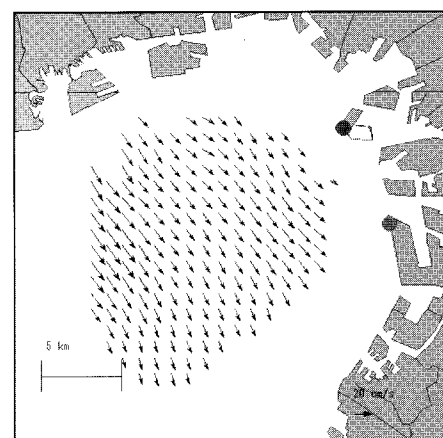


図-6 西風強風時の日平均流速分布 (2003/12/7)

また、淀川の日平均流量は約 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ の平水流量を示していた。観測された表層平均流は、大阪湾奥部全域で

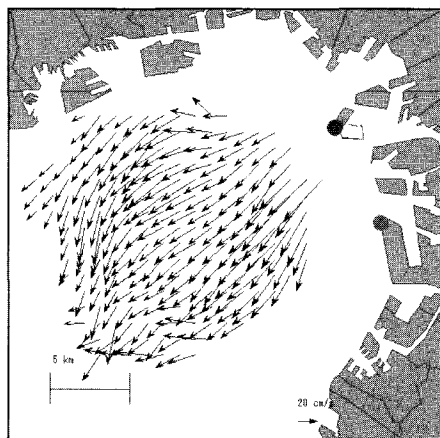


図-7 台風上陸4時間前の流速分布 (2004/10/20 14:00)

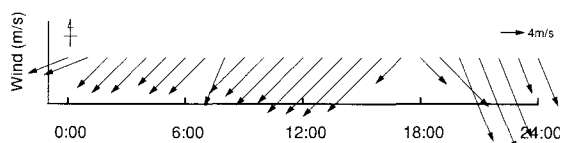


図-8 2004年10月20日の風況 (大阪市北港)

概ね風向に沿った約20 cm/sの南東流を示している。吹送流は風速の約2～3%を示し、図からも吹送流が卓越した流れ場であることがわかる。風向と流向の若干の不一致は、コリオリ力の影響とともに海上風と陸上風（神戸海洋気象台の観測値）の差異によるものと推測される。

(4) 台風接近時の流況

観測期間中の2004年10月20日、台風23号が大阪に接近し、18時には大阪府南部に上陸した。一部のデータ欠測はあったものの、接近時と上陸時のデータを採取することができた。図-7に上陸4時間前の流況を示す。観測時には台風に伴う降雨により大和川からの出水もあったが、台風がもたらした最大風速30 m/sの暴風も湾奥部の流況に及ぼす影響が広域かつ大きいことがわかる。淀川の出水については、ピークが現れる前に電源トラブルにより観測が中断したため、流出流の規模については不明である。ちなみに、18時には最大80 cm/sの流速が淀川河口で観測されている。

図-8は、この日の風況変化を示しており、台風の上陸前後で大きく風向が変化していることがわかる。台風通過時の風向と表層流向の関係を図-9に示す。比較のため風向は180°加えた吹送方向で示している。15:45までは台風が遠方にあり、風向が安定していたため流向も安定し、風と同方向を示していた。しかし、台風の上陸前後には、風向が北東→北北西に変化したものの表層流向は風向の急激な変化に追従せず、流れが南西から南に

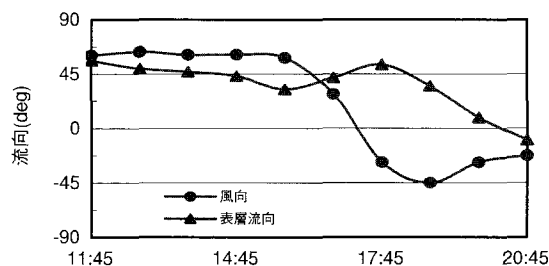


図-9 風向と湾奥部の表層流向の推移 (2004/10/20)

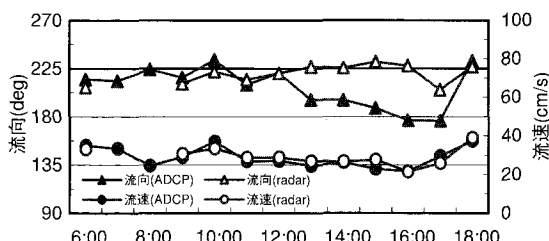


図-10 レーダーと ADCP の比較 (2004/10/20)

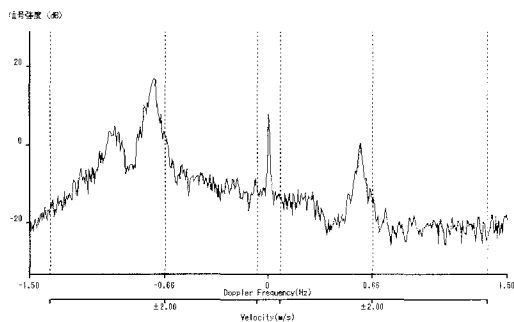
変わったのは台風が上陸してから約2時間後であり、風向と表層流向がほぼ同じ方向を示すにはさらに1時間を要した。つまり、湾奥部においては今回のように発達した吹送流の風応答には約3時間もの時間を要していた。

4. 解析および考察

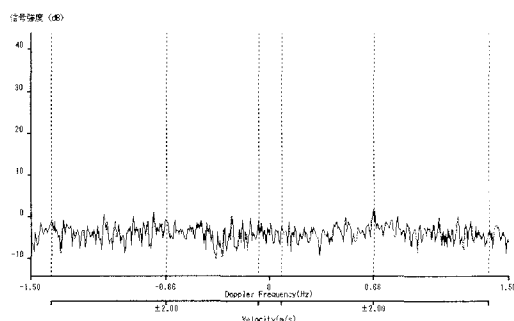
(1) 台風時のレーダー特性

レーダーの精度を検証するために、観測域に位置する Pt. 1 (図-1) の海底に ADCP を設置し、レーダー観測と合わせて流速分布の連続計測も実施した。その流速比較を図-10に示す。ADCPでは表面波やサイドロープの影響で水面近傍の流速データが採取できないため、ここでは水面下約1.5 mの流速値で比較している。7時と8時に欠測となっているが、概ね流速は一致している。しかし、風が強まった13時以降は、両者の流向が大きく異なっていることがわかる。これは、吹送流の発達により、表層付近の流速構造が変化し、流速が水深方向に一様でなくなったためと考えられる。ADCPによって計測された流速分布の経時変化を調べると、風と波が強くなる10月20日13時以降、大きな内部流動が生じ、表層付近の流動も大きく変化していることがわかった。

これらのことを考えると、吹送流と風波が発達する強風時においても、レーダーにより表層流動を十分な精度で捉えることができると言える。しかし、風速が大きくなりある限界を超えると、伝播損失の増大により S/N 比が低下しはじめた (図-11)。今回の観測では、S/N 比の低下は風速20 m/sを超えると起こりはじめ、風速

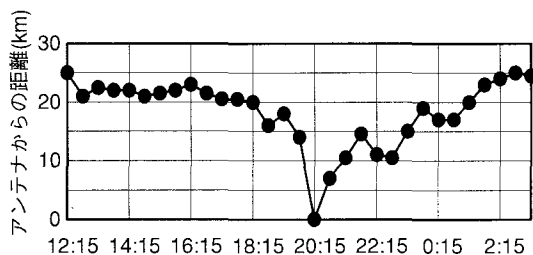


(a)2004/10/20 14:15 (B局 beam4,range13)



(b)2004/10/20 20:15 (B局 beam4,range13)

図-11 ドップラースペクトル

図-12 観測可能な最遠レンジの遷移
(2004/10/20 B局 beam 4)

25 m を超えると観測レンジが15 km 以下に低減した(図-12)。

(2) 海上風の推定

海洋レーダーの波浪スペクトルの方向分布関数として(1)式を採用し、1次散乱の正負2つのピークのエネルギー比を R (dB)とすれば、その地点における海上風の風向(主波向)は、(2)式によりおおそ推定される(猪俣ら, 1991)。

$$F(\theta) = F_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \alpha}{2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$R = 10 \log_{10} \left(\cot^{2s} \left(\frac{|\theta - \alpha|}{2} \right) \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 α は風向、 θ は波向(レンジ方向)、 s は集中

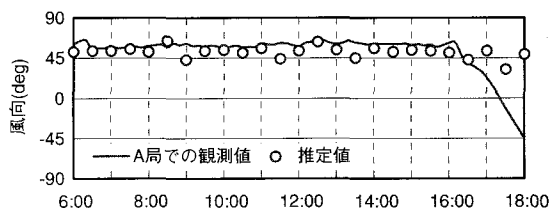


図-13 海上風向の検証(2004/10/20)

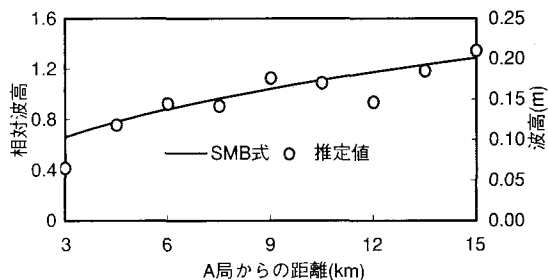


図-14 吹送距離と波高の関係(2004/10/20)

度パラメータである。

集中度パラメータ s は、海象状況により大きく変化し、観測時の値を直接知ることにはできない。そこで簡単のため、安定した風が連吹する台風時には、波浪もほぼ空間的に一様であると考え、風向および集中度パラメータを空間的に一定と仮定して解析を行った。計算には、A局の各ビームの6レンジ(局から3 km)のデータを用いて、上式を基に海上風向の推定を行い、A局で観測された実測風向との比較を試みた。その結果を図-13に示す。

台風の接近と上陸により風向が大きく変化した17時以降を除き、推定された風向は実測風向を良好に再現しており、ある程度の風速により比較的良好な2次散乱が得られれば、海上風向の推定が容易に行えることがわかった。ちなみに、試行計算で得られた集中度パラメータは0.9~1.2の安定した値を示していた。

(3) 有義波高の推定

海洋レーダーを用いた波浪スペクトルの推定方法に関しては幾つかの方法が提案され、解析も試みられている(橋本ら, 1998; 児島ら, 2001)。しかし、海洋レーダーの測定精度とS/N比の問題から、実用化に至っていないのが現状である。そこで、ここでは簡易的な方法として、2次散乱強度の積分値が波のエネルギーに比例するものと考え、波高の推定を行った。実際には、1次散乱強度で規格化し相対波高として算定した。解析には台風接近時の2004年10月20日15:00のデータを使用した。

図-14は、解析によって得られた吹送距離と相対波高の関係を示したものである。このときの風速は15.7

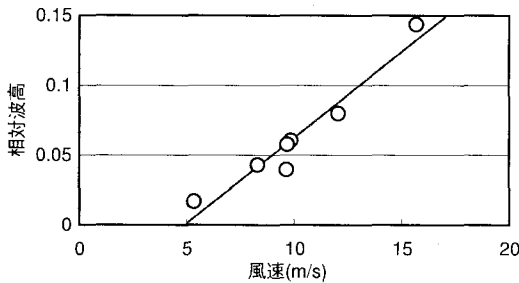


図-15 風速と波高の関係

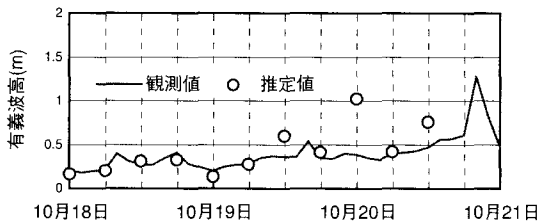


図-16 波高の経時変化

m/s, 風向は東北東で使用したビームの方向と一致しており, 図の横軸は A 局からの距離を表すとともに吹送距離を表している. 図には参考までに, SMB 式による関係も図示した. 吹送距離の増加に伴い徐々に波高が増加し, その傾向は SMB 式ともよく一致している.

図-15 は, 風速と波高の関係を示したものである. 風速の増加に伴い線形に波高が増大し, 明瞭な相関が認められる. ただし, 風速 5 m/s 以下では 2 次散乱の S/N 比が低下し, 波浪情報の抽出は困難であった.

図-16 は神戸港沖の波浪観測データと比較した結果である. 実測された有義波高の経時変化とよく追従しているが, 時折異常に大きな値を示している. このときのレーダーのスペクトルを調べたところ, 1 次散乱に 2 つピークが存在し, 特殊な流況を有していたことがわかった. その影響で 2 次散乱も広周波数域に拡がり, 大きなエネルギー値を示したことがわかった. このように, 2 次散乱を利用した波浪情報の推定には, 信号の質が大きく関わり, 今後, 良質な信号を得るためのハード, ソフト面の一層の改良が必要であると考えられる.

5. ま と め

大阪湾奥部において DBF 海洋レーダーを用いた流況の現地観測を行い, 得られたデータを基に流況の解析とレーダーの性能評価を行った. 主要な結果は以下のとおりである.

- (1) 日スケールの流況には出水や風の影響が現れるが, 15 日間の残差流計算が示す流況には吹送流の影響はほとんど見られなかった.
- (2) 2003 年 11 月 30 日の出水時には日平均流速が 40 cm/s を超える大きな流速がレーダーにより観測された.
- (3) 湾奥部においては吹送流の応答に数時間を要し, 例えば北東から北北西への風向変化に対し約 3 時間の応答時間を要した.
- (4) 台風接近時には S/N 比が向上するとともに, スペクトルには 2 次散乱が明瞭に現れる. 風向が大きく変化した台風上陸時には 2 次散乱のピークはノイズに埋もれ検知できなくなった.
- (5) 最大風速が 20 m/s を超えると伝播損失により S/N 比が低下しはじめ, 25 m/s を超えると観測レンジが 15 km 以下に低減する.
- (6) 台風接近時のレーダーのスペクトルデータを用いて波高と波向の推定を行ったところ良好な結果が得られ, レーダーによる波浪情報の推定がある程度可能であった. ただし, 風速 5 m/s 以下では S/N 比の低下により波浪情報の抽出は困難であった.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 国土交通省神戸技術調査事務所, 大阪市港湾局ならびに大阪府環境農林水産部には現地観測に際しご高配いただいた. 記して感謝の意を表する次第である. なお, 本研究の一部は科学研究費補助金によってなされたことを付記する.

参 考 文 献

- 児島正一郎・橋本典明・佐藤裕司(2001): 一次散乱を考慮した海洋短波レーダーによる波浪の方向スペクトルの推定法, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1436-1440.
- 坂井伸一・平口博丸・松山昌史・坪野孝樹・森 信人・杉山陽一・藤井智史・佐藤健治・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ーの開発, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1511-1515.
- 坂井伸一・松山昌史・坪野孝樹・森信人・中辻啓二・西田修三・中池悦朗・谷川陽祐(2004): DBF 海洋レーダーによる沖の瀬環流域の広域流動観測, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1416-1420.
- 中辻啓二・西田修三・清水隆夫・坂井伸一・松山昌史・坪野孝樹・森信人(2004): 浮遊物の挙動予測に向けた海洋レーダーの適用性評価, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1436-1440.
- 橋本典明・徳田正幸(1998): 海洋短波レーダーによる方向スペクトルの推定, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1271-1275.
- 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.
- 猪俣英行 他(1991): 短波海洋レーダー, 通信総合研究所季報, Vol. 3, No. 3, pp. 343-438.