

内湾域における水平流動構造解明に対する DBF海洋レーダの適用性に関する研究

STUDY ON APPLICABILITY OF DBF OCEAN RADAR TO HORIZONTAL CURRENT FEATURE ANALYSIS IN INNER-BAYS

坂井伸一¹・坪野考樹¹・多田彰秀²・染矢真作³・竹之内健太³・水沼道博⁴

Shin'ichi SAKAI, Takaki TSUBONO, Akihide TADA, Shin'saku SOMEYA,
Kenta TAKENOUCI and Michihiro MIZUNUMA

¹正会員 工博 電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²正会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

³学生会員 長崎大学大学院 生産科学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

⁴非会員 工修 西日本技術開発株式会社 調査解析部 (〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通1-1)

The reliability of horizontal current features such as tidal ellipse, residual currents, divergence and rotation detected by the DBF ocean surface radar were evaluated through comparison with other research works in Ariake Bay. The results showed that the feature of the principal tidal components M2 was widely coincided well with other ADCP field observations. Based upon the continuous current data by the DBF ocean radar, the characteristics of the divergence, rotation and inflow were precisely investigated on the line of Isahaya Bay mouth.

Besides, the daily and seasonal fluctuation of noise floor level on the receiving signals was analyzed. The results indicated that the increase of the noise level ~15dB around 7a.m. and 7p.m. to 9p.m. affected on the decrease of the maximum detection range of the velocity ~10km. The property of the noise level fluctuation can be incorporated into the auto-detection algorithm of the velocity in ocean radar systems.

Key Words : DBF Ocean Radar, Ariake Bay, Horizontal Current Feature, Noise Floor Level

1. はじめに

我が国では、1988年に通信総合研究所（現 情報通信研究機構）がHF帯を用いた海洋レーダを開発して以来、本格的な陸上設置型レーダによる海洋観測の研究が開始された。通信総合研究所のHFレーダは、1990年代に多くの研究機関との共同観測に用いられ、その有効性が確認された¹⁾。電力中央研究所では、発電所前面海域の環境モニタリングの効率化を目指して、従来の海洋レーダに対して1/4程度となる15分間隔で連続観測ができるVHF帯のDBF海洋レーダを開発し²⁾、ゴミ等海洋浮遊物追跡やデータ同化モデルによる3次元流動場推定に関する研究に取り組んでいる^{3),4)}。近年になり、海外で開発されたコンパクト型の海洋レーダを対馬海流や宗谷海流の観測へ適用した研究⁵⁾や、海上保安庁や国土交通省などが各業務への活用を目指して、HFレーダや海外のレーダ等を導入する動きが見られる。

このように近年普及がめざましい海洋レーダであるが、その観測システムを沿岸水理学や海岸工学の分野へ活用していく上では、i) 海域特性の違いによる流速検知性能の変化、ii) 観測データの時空間代表性、iii) 電波形成方式やハード構成面の違いによる性能特性、iv) 外来ノイズに対する信号特性変動などに関して十分な検討を重ね、知見を集約していくことが重要である。しかしながら、現状では実証研究を通じてこれらの点が体系的に整理されるには至っていない。

DBF海洋レーダの例では、上記i)に関し、伊勢湾と大阪湾での実証研究に加え⁶⁾、本研究の対象海域である内湾部（有明海諫早湾湾口部）においてもADCPの航走観測との比較を通じた測定精度の検証を一部行っている⁷⁾。ただし、観測データから算出される潮流や残差流等の空間構造に関する検証はまだなされていない。ii)に関しては、電磁波のドップラー効果を利用する海洋レーダの観測値は、電波のレンジ方向とアジマス方向に広がりを持った空間平均値であり、遠方に行く程、また2地点か

らの電波の交差角が 90° から離れる程、水平流速ベクトルの精度が低下する。この点については、測定誤差楕円に関する理論的かつ実証的なHFレーダに関する研究例⁸⁾はあるものの、時空間代表性に関する微細構造に言及した研究例はまだ存在しない。この点に関する知見の蓄積は、ドップラースペクトル上の1次散乱ピークが2又に分かれる現象説明や波浪の影響を受ける2次散乱との関連性の理解に重要となる。iii)については、同一海域においてタイプの違う複数のレーダによる同時観測を実施する必要があるが、同一周波数を用いると干渉するため、厳密な比較はできない。DBF海洋レーダを用いた比較例はないが、対馬海峡において25.4MHz帯のアレイアンテナタイプ（DBF海洋レーダも同タイプ）と13.9MHz帯のループアンテナタイプとを比較した実験がある⁵⁾。この例では、ループアンテナ型はアンテナパターンの変位から到来方向を推定するため、地形影響を強く受ける沿岸域などでは系統的誤差が発生しやすいなどの点が示唆されている。iv)に関しては、DBF海洋レーダに限らず、ほとんど研究例がなく、唯一HFレーダを用いたノイズ実測と数値シミュレーションによる波浪観測（2次散乱）への影響を考察した基礎研究があるのみである⁹⁾。海域毎のノイズ特性を把握することは、波浪観測のみならず、1次散乱から流速を自動検知するアルゴリズムの精度を向上させる上で非常に重要となる。

本研究の目的は、内湾域である有明海諫早湾湾口部を対象にしたDBF海洋レーダによる秋季と冬季の観測を通じて、上記i)における水平流動構造の検知性能の検証を行うとともに、上記iv)に関して内湾域におけるノイズ特性とその観測データへの影響について考察することである。なお、大きな潮位差と広大な干潟域を有する有明海では、独特の生物活動や漁業形態が見られるが、近年のノリの色落ちや貝類等底生生物の大量死など、水環境の悪化が問題となっており、水質と流動構造の関連性に関する多くの研究が実施されている。例えば、八木らの研究¹⁰⁾では、干潟縁辺部の底層残差流に対して表層の吹送流が重要な影響を果たしていることが指摘されている。この例からもわかるように、海洋レーダで捉えられる表層流動構造は、海域の物質循環や水質形成との関連性を見る上で、非常に重要な意味を持つと言える。

2. 現地観測の概要

現地観測の詳細については、多田ら⁷⁾に詳しいので、以下にその概略についてのみ述べる。2台のDBF海洋レーダを、図-1に示す長崎県雲仙市西郷（A局）と熊本県荒尾市蔵満（B局）に設置し、2005年8月30日から2006年3月9日の間、諫早湾湾口部を中心に約15km四方の表層流動ベクトルを15分間隔で観測した。図-1の点線は、各受信ビームの方向を示しており、レンジ方向の空間分解能

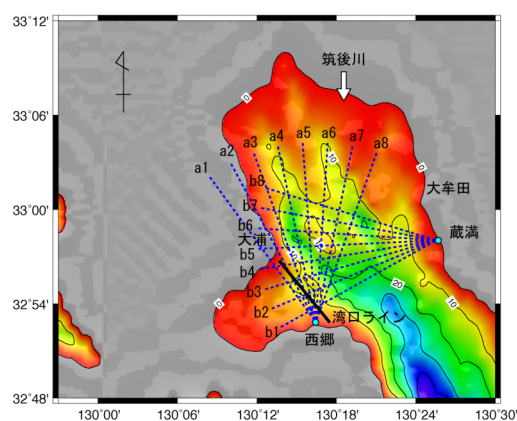


図-1 現地観測の領域と水深分布

0.5km、最大探知距離25kmまでの視線流速成分が測定され、2方向の視線流速をベクトル合成することにより、0.5km格子の表層流動ベクトルが算出される。なお、図-1の実線は水深を表す。

諫早湾の湾口部を横断するライン（図-1）に沿って、大潮期である2005年9月20日に、船舶航走式によるADCPの流速同期観測を9潮時において実施した。湾口ラインの4測点において、9潮時の観測から得られた欠測を除く35個の流速データ同士を比較した結果、流速の大きさに関して相関係数0.78、標準誤差11.4cm/s、流向に関して相関係数0.96、標準誤差 28.2° という結果が得られた。DBF海洋レーダが測定水深0.3m、ADCPが測定水深2mという違いはあるものの、両者は良く対応していることがわかる。風のデータから一部の潮時において吹送流の影響が見られるが、ADCPによる流速鉛直分布およびSTD観測による密度分布から概ね順圧的な流れが確認された。これより、両データの違いの要因としては、測定層の違いによる影響は小さいと考えられ、両測器の時・空間的な測定原理やデータ処理の違い（ADCPはライン上のほぼ瞬間値、DBF海洋レーダは数100m四方の12分間平均値）による影響が主であると推論できる。以下の解析では、2005年9月20日から10月5日までの秋季観測と2006年2月6日から2月21日までの冬季観測のデータを用いて、流動の水平構造についてさらに詳細な検証と考察を行う。

3. 水平流動構造に関する観測結果

(1) 調和解析結果

図-2(a), (b)に秋季15日間の観測データから調和解析によって求めたM2分潮とK1分潮の潮流楕円を示す。主要分潮であるM2の分布では長軸が大きく卓越しており、有明海湾奥方向と諫早湾湾奥方向とに入退潮が二分化している。一方K1の方は、全体の流軸はM2とほぼ同様であるが、諫早湾への入退潮は明瞭ではなく、有明海湾奥方向の長軸もM2が40cm/s程度であるのに対し、5cm/s程度と小さくなっている。濱田¹¹⁾は、大浦の南南東沖合約3km

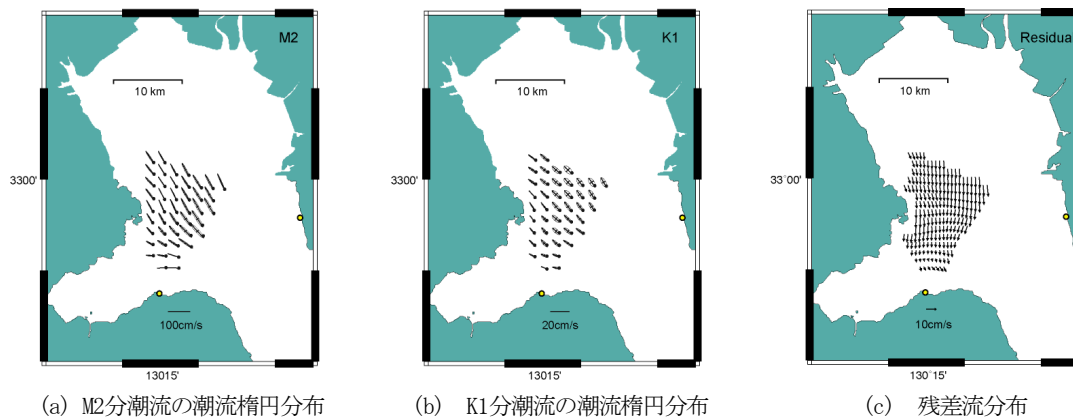


図-2 DBF海洋レーダの観測データから求めた秋季15日間の調和解析結果（潮流楕円内の●は位相を示す）

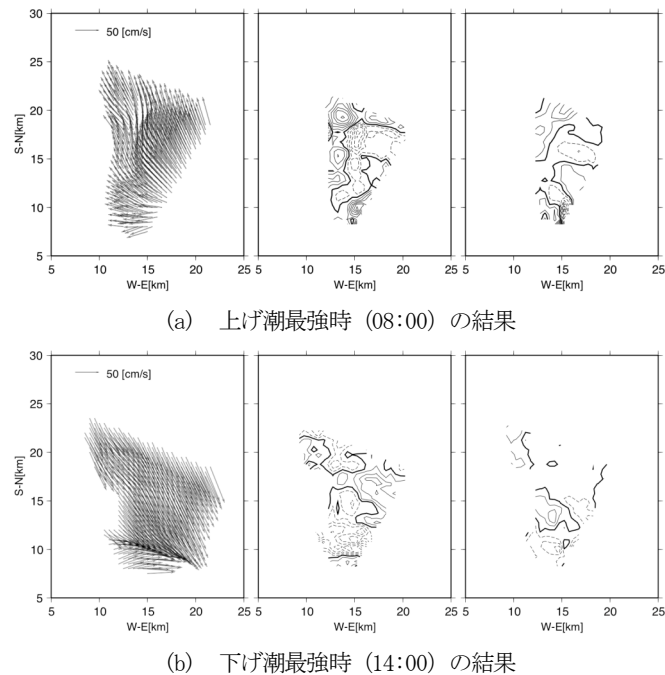


図-3 秋季（9月20日）における流速ベクトル（左），発散（中），渦度（右）の水平分布

の地点（水深9m）において、2003年の秋季約2ヶ月間のADCP（海底設置）による長期流動観測を実施している。その最上層（水深1.8m程度）のM2潮流楕円の結果を本解析結果と比較すると、流向は一致し、大きさも本解析結果21cm/sに対して16cm/sと良く対応している。小田巻ら¹²⁾は、2001年の5月にADCPを12測点に係留し15昼夜の連続観測を実施している。本解析範囲に該当する測点の結果も得られており、M2分潮流の流軸方向、大きさとも本解析結果と良く一致している。以上は、観測年や時期が違うため厳密な比較ではないが、本結果と他の非成層期の観測結果との間に整合性が認められた。

図-2(c)に、期間平均による残差流分布を示す。残差流は、期間中の成層強度や風、河川流量の影響を受けて経時変化する。濱田¹¹⁾は、同海域の残差流の長周期変動について、潮汐、河川流量、風速との標準化偏回帰係数からその関連性を調べている。その結果、非成層期では潮汐の影響を強く受け、2週間程度の変動があることを確認した。本期間中の平均風速は北北西に2.45m/sであり、期間中の筑後川の流量（国土交通省提供）もほぼ

60m³/s程度で一定であった。これより、本解析結果は潮汐残差流の影響を強く受けた秋季の代表的な残差流分布を捉えていると考えられる。次に、同じく非成層期の5月に観測を実施した小田巻ら¹²⁾の結果と比較した。その結果、流速の大きさは10cm/s弱程度と概ね一致したが、流向に関しては、小田巻らの結果が時計回りの循環傾向を示しているのに対し、本解析結果では全体的に湾奥部から南下した流れが大浦近くの沿岸に沿って諫早湾湾口部へと南南東方向に流速を減少させながら横断する結果となり、両者に違いが見られた。

(2) 発散と渦度

表層流動分布の変化を、時空間的に高密度で捉えることができる海洋レーダのデータは、残差流同様、物質の循環現象に係わる発散や渦度の空間分布を算出するのに適している。一例として、図-3(a), (b)に2005年9月20日（大潮時）の08:00（上げ潮最強時）と14:00（下げ潮最強時）の流速ベクトル、発散、渦度を示す。発散と渦度のコンターは、 $5 \times 10^{-5} (s^{-1})$ 間隔に示しており、太い

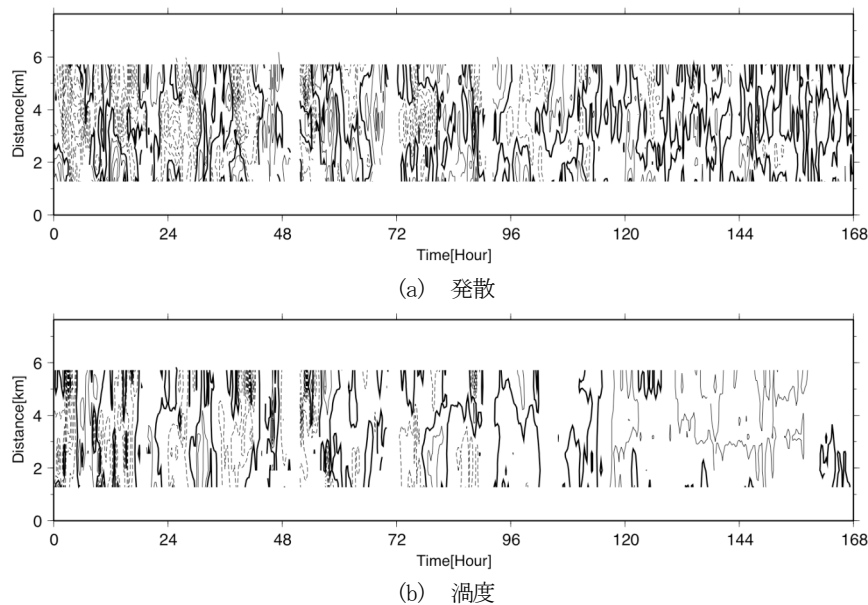


図-4 秋季諫早湾湾口ラインにおける発散と渦度の時系列 (2005年9月20日～9月26日)

実線で示す0の値を境にして、正を実線、負を点線で示している。渦度は反時計回りを正としている。上げ潮時の結果を見ると、解析領域を東西に二分する形で収束（東側）と発散（西側）域がはっきりと分かれ、ピーク値は正負とも $\pm 3 \times 10^{-4}$ 程度となった。渦度は、ほぼ南西から北東方向に正と負が交互に出現しており、ピーク値は発散と同様 $\pm 3 \times 10^{-4}$ 程度となった。一方、下げ潮時の結果では、有明海湾奥と諫早湾湾奥からの流れが諫早湾湾口部前面でぶつかっており、発散よりも収束が卓越し、ピーク値はそれぞれ 2×10^{-4} 、 -3×10^{-4} 程度となった。渦度は、上げ潮時とは反対に南西から北東方向に負と正の順に渦度が出現しており、ピーク値は $\pm 2 \times 10^{-4}$ 程度であるが、一時的に諫早湾湾口北部で -5×10^{-4} 程度の値を示した。なお、上げ潮時の流速の最大値は78cm/s、下げ潮時は110cm/sで、いずれも解析範囲の中央東寄りで出現している。秋季小潮時に関しては、全体的に流速が小さく、発散、渦度とも明瞭な分布傾向が見られなかった。また、発散のピーク値は $\pm 1 \times 10^{-4}$ ではあったが、全体的に発散も渦度も 10^{-5} のオーダーとなっており、大潮時に比べて1オーダー小さくなった。さらに、冬季のデータに関して見ると、秋季に比べ欠測のデータが多かったが、大潮期の上げ潮時は発散と正の渦度、下げ潮時は逆に収束と負の渦度が卓越する傾向にあり、ピーク値は、 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 程度であった。流速の最大値は上げ潮時が72cm/s、下げ潮時が82cm/s程度と秋季に比べて小さくなった。冬季小潮期は、秋季同様流速、発散、渦度とも大潮期より小さく、発散と渦度のピーク値は $\pm 1 \times 10^{-4}$ 程度で、全体的なオーダーは 10^{-5} 、流速の最大値40cm/sとなった。

次に、2005年9月20日から9月26日における諫早湾湾口ラインに沿った発散と渦度の時系列を図-4(a)、(b)に示す（縦軸は南東端点から北西端点への距離）。また、大浦における潮位の時系列を図-5に示す。図より、期間前

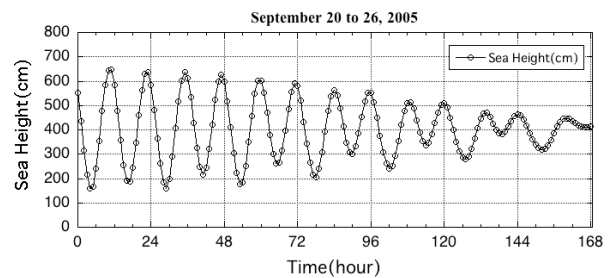


図-5 大浦における潮位の時系列 (2005年9月20日～9月26日)

半の大潮期はライン全体において、下げ潮時に発散、上げ潮時に収束となる関係が見られる。一方、小潮期は、流れが小さくこのような関係は見られない。渦度については、湾口ラインの南側を中心に、大潮の下げ潮時に高気圧性、上げ潮時に低気圧性の渦が見られる。

福岡県有明水産試験場は、1973年夏季に筑後川河口から大牟田沖にかけての干潟域において、複数個の漂流板を放流し、30分毎の移動追跡結果から水平発散を算出した¹³⁾。その結果、発散と収束のオーダーは、 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5} (\text{s}^{-1})$ と本解析結果と同じ範囲となり、観測時期や手法の違いはあるものの、同一オーダーの結果が得られた。海洋レーダのデータを用いることにより、漂流ブイ等によるラグランジュ追跡手法に比べて、均一かつ詳細な流動の空間構造を常時把握することができ、海洋におけるゴミ集積場所の特定などへの活用が期待できる³⁾。

(3) 諫早湾への流出入量

DBF海洋レーダの流動ベクトルを基に、諫早湾の湾口ラインと直交する流動成分を算出し、ライン長7.6kmをかけて求めた線流量について、湾内への流出入に関する時系列解析を行った。なお、先に述べた9月20日のADCP観測の結果、湾口ラインの流速の鉛直分布は、ほぼ順圧

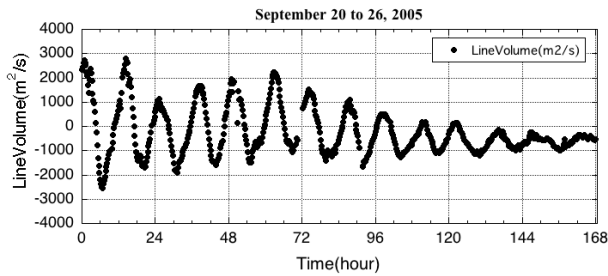
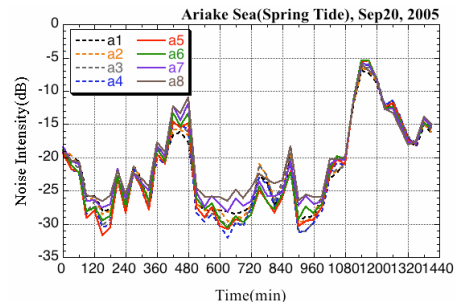


図-6 諫早湾口ラインを通過する線流量の時系列 (秋季)

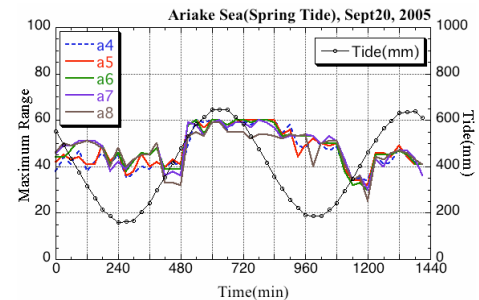
場となっていたため、表層の線流量に断面の平均水深をかけることによって湾口を通過する流出入をある程度見積もることも可能となる。秋季観測前半の時系列を図-6に示す。湾外への流出を正、流入を負として示している。図-5の大浦の潮位変動と比べると、潮位に対してほぼ位相差なしで流出入変動が対応していることがわかる。すなわち、満潮から干潮にかけて流出、干潮から満潮にかけて流入となっており、干満の中間でそれぞれ流出入量はピーク値を示している。ここで、9月24日(96hour)の中潮以降、次第に流出量が減っていき、25日～26日の小潮期には流入のみとなっている点が注目される。この傾向は27日まで続いた。風況のデータを見ると、期間前半の大潮期から中潮期までは時間風速3m/s以下の風況下であったのに対し、この小潮期間は時間平均で5m/s以上の強い北～北西の風が卓越しており、表層で流入が続く傾向は、風によるエクマン輸送と考えられる。この風が強い時期については、下層の流動場が表層流動場に追従するとは限らないため、断面通過流量を単純に見積もることはできない点に注意が必要である。なお、冬季に関しても、潮位と流出入が対応する傾向が確認された。

4. ノイズ変動特性の影響

図-7(a), (b)に、秋季大潮期における各ビームのノイズレベルの時系列、および対岸の影響を受けないA局のビーム4～ビーム8の最大探知距離(1レンジは0.5km)、および大浦の潮位を示す。ノイズレベルは、各ビーム毎に全レンジのノイズフロアの平均値として算出した。図-8(a), (b)には、冬季大潮期の結果を示す。島原のAMeDASのデータでは、両日とも曇りで秋季は平均風速1.8m/s、平均気温27℃、冬季はそれぞれ5.3m/s、6.2℃であった。秋季の結果を見ると、各ビームともほぼ同一のノイズレベルで時間的に変動が激しいことがわかる。特に午前7時(420min)と午後7時(1140min)から9時(1260min)にかけて、10dB～15dB程度ノイズレベルが上がっている。この影響により、最大探知距離が10～20レンジほど短くなっている。一方、ノイズレベルと最大探知距離については、潮位との関連性は見られない。図-1に示すa7とa8のビームは、水深10mより浅い海域ま

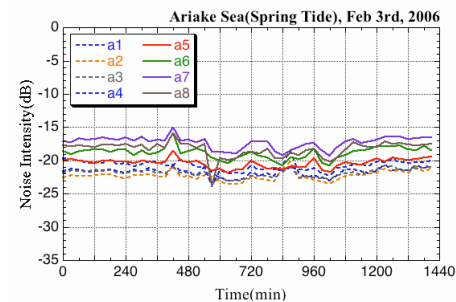


(a) ノイズレベル (全ビーム)

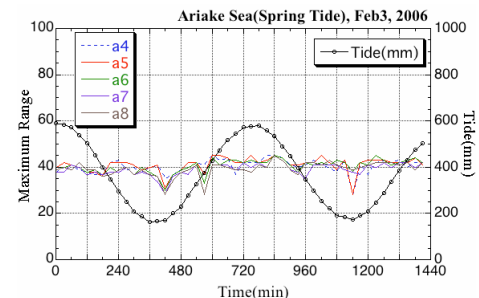


(b) 最大探知距離 (ビームa4～a8)

図-7 秋季大潮期におけるノイズレベルと最大探知距離の変動



(a) ノイズレベル (全ビーム)



(b) 最大探知距離 (ビームa4～a8)

図-8 冬季大潮期におけるノイズレベルと最大探知距離の変動

で及んでいるが、干潮時に最大探知距離が短くなるといった傾向はなく、本観測に対する干潟の影響は見られなかった。冬季のノイズレベルは、ビーム毎にばらつきはあるものの、午前7時くらいにややノイズレベルが上がる以外はほぼ終日変化がなく、最大探知距離についても朝7時に10レンジほど短くなる以外はほぼ変動が見られなかった。ただし、秋季に比べ、冬季のノイズレベルが高いため、平均的な最大探知距離は、冬季の方が短くなった。

過去に伊勢湾、明石海峡、および淀川前面域においてDBF海洋レーダを用いて実施した冬季流動観測においても、本海域の秋季同様、明け方と夕方から夜にかけて

15dBほどノイズレベルが上がる傾向が見られた。また、2004年に大阪湾に上陸した台風23号接近時には、堺市のレーダサイトにおいて最大25dB程度のノイズ上昇が起こった。これらのノイズ上昇は、自然雑音と人工雑音とからなる外部雑音の変化によると考えることができる。自然雑音は空電雑音（雷放電）、宇宙雑音、太陽雑音から成り、人工雑音は交通機関や送電線、および工場や家庭の電気・電子機器などが発する雑音の総和である。本レーダが使用するVHF帯は宇宙雑音と人工雑音から同程度の影響を受ける¹⁴⁾が、地域や地形によって雑音の発生源が異なるため、その要因を特定していくことは難しい。有明海周辺域では、第一次産業が盛んなため人工雑音の影響は都市部に比べて小さいと予想される。しかしながら、秋季と冬季の観測日に雷は発生しておらず、自然雑音がこのような受信電波の定性的なノイズ変化に影響を及ぼしているとは考えにくい。DBF海洋レーダでは、自動流速検知アルゴリズムとして、S/N比とモーメント法をベースとした手法を採用している²⁾。本研究では、ノイズの原因を特定するには至らなかったが、このようなノイズフロアの変化をアルゴリズムに組み込むことによって、自動流速の検知精度の向上を図ることができる。

5. まとめ

本研究では、海洋レーダによる沿岸水理現象における水平流動構造解明への適用性を検討するため、内湾域においてDBF海洋レーダによる秋季～冬季の現地観測を実施した。得られた観測データから求めた流動構造を他の観測結果等と比較し、信頼性の検証を行った。また、知見の少ないノイズレベルに関して、実測データを基に観測結果に及ぼす影響について考察を行った。その結果、DBF海洋レーダにより、内湾域の物質循環に影響を及ぼす潮流、残差流、発散、渦度などの詳細な水平流動構造を時空間的に把握できる見通しが得られた。また、受信電波に対するノイズの日変動と季節変動特性を把握することができ、得られた知見を自動流速検知アルゴリズムに反映させることにより、流速の測定精度を高度化できる見通しが得られた。

謝辞：本研究を実施するにあたり、DBF海洋レーダの設置・撤去に関して、電力中央研究所の松山昌史氏、芳村毅氏、西日本技術開発株式会社の西修氏、久保新氏、加来仁悟氏に協力していただいた。また、送受信電波の調整においては、琉球大学の藤井智史教授にご尽力いた

いた。ここに重ねて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤井智史：海洋レーダの技術と歴史，沿岸海洋研究，第41巻，第2号，pp.73-82，2004.
- 2) 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，松岡健志：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.
- 3) 中辻啓二，西田修三，清水隆夫，坂井伸一，松山昌史，坪野考樹，森信人：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.1436-1440，2004.
- 4) 坂井伸一，平口博丸，松山昌史，坪野考樹，森信人：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.1309-1314，2003.
- 5) 吉川裕，増田章，丸林賢次，石橋道芳，奥野章，山下義幸：HFレーダーによる対馬海峡表層海流観測－計測精度の検証－，沿岸海洋研究，第41巻，第2号，pp.109-117，2004.
- 6) 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：DBFレーダによる沖ノ瀬環流域の広域流動観測，海岸工学論文集，第51巻，pp.1416-1420，2004.
- 7) 多田彰秀，竹之内健太，坂井伸一，染矢真作，水沼道博，中村武弘：DBF海洋レーダによる諫早湾湾口部の流況観測，海岸工学論文集，第53巻，2006（印刷中）.
- 8) Nadai, A., Kuroiwa, H., Mizutori, M. and Sakai, S.: Measurement of Ocean Surface Currents by the CRL HF Ocean Surface Radar of FMCW Type. Part 2. Current Vector, *J. Oceanography*, Vol.55, No.1, pp.13-3-, 1999.
- 9) 児島正一郎，橋本典明，徳田正幸：海洋短波レーダによる波浪観測に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第48巻，pp.1446-1450，2001.
- 10) 八木宏，井瀬肇，松村航裕，木元克則：有明海湾奥部干潟前縁域の流動構造と懸濁態物質輸送特性に関する現地観測，水工学論文集，第50巻，pp.1465-1470，2006.
- 11) 濱田孝治：有明海湾奥における循環流とその変動に関する研究，九州大学大学院総理工学府博士論文，118p，2005.
- 12) 小田巻実，大庭幸広，柴田宣昭：有明海の潮流新旧比較観測結果について，海洋情報部研究報告，第39号，pp.33-61，2003.
- 13) 井上尚文：有明海の物理環境，沿岸海洋研究ノート，第17巻，第2号，pp.151-165，1980.
- 14) 岩井登：電波ってなあに，電波振興会，365p，1987.

（2006. 9. 30受付）