# VHF帯を用いたDBF海洋レーダにおける データ測得率に及ぼす要因に関する考察 STUDY OF IMPACT FACTORS ON DATA ACQUISITION RATIO FOR DBF OCEAN RADAR WITH VHF BAND

吉井 匠<sup>1</sup>・坂井 伸一<sup>2</sup>・坪野 考樹<sup>2</sup>・松山 昌史<sup>3</sup> Takumi YOSHII, Shin'ichi SAKAI, Takaki TSUBONO and Masafumi MATSUYAMA

1正会員 修(工) (財)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 (財)電力中央研究所 環境科学研究所(同上)
 3正会員 工修 (財)電力中央研究所 地球工学研究所(同上)

The acquisition ratio of observational data by ocean radar presents a cyclic variation synchronized with tidal motion and an abrupt decreasing due to the meteorological conditions. Information relevant to the property of variation of the data acquisition and the impact factors on its variation is important for practical uses of ocean radar observation systems. The authors investigated the impact factors to the data acquisition ratio of the DBF(Digital Beam Forming) ocean radar with VHF band, central frequency 41.9MHz through long-term observation in Ariake Bay. As a result, the appearance of tidal flat along the coast off Arao mainly affected the cyclic variation of the data acquisition due to the transmission loss of radio waves. Besides, the flood from Chikugo River accompanied by heavy rainfalls and the decrease of conductivity at sea surface caused the abrupt decline of the acquisition ratio. At the term of weak wind less than 1m/s, the data acquisition also decreased by way of suppression of surface resonant wave.

Key Words : data acquisition ratio, DBF ocean radar, tidal effect, wind effect, fresh water effect

## 1. はじめに

近年、国内において海洋レーダの導入数が着実に増え ており、外洋域における海流の挙動把握<sup>1),2)</sup>や、沿岸域 における潮流や残差流などの流動特性の調査<sup>3),4)</sup>に利用 されている.陸上リモートセンシングである海洋レーダ の最大の特徴は、広範囲の表層流速分布を連続して長期 観測できる点にあるが、常に安定して全点のデータが得 られるとは限らない<sup>5)</sup>.これは観測に電波を用いている ことと、流れを直接計測するのではなく、海面波の位相 速度のドップラー変化から流速成分を間接的に算出する ことに由来する.電波を用いるため、周囲状況によって は受信電波のS/N比が変化し、それによって観測状況が 悪化する場合がある.また、直接的にはブラッグ散乱を 起こす海面波からの反射波を計測しているため、海面波 の発達状況によっても観測状況は変化する.

このような海洋レーダのデータ測得率に影響を与える と考えられる要因を整理すると、表-1のようになる.こ れらについては、外来ノイズの実測例<sup>60</sup>やノイズレベル と最大探知距離との変動特性に関した研究事例<sup>60</sup>はある 表-1 データ測得率に影響を与える要因.

<ul> <li>(1) 伝播中の電波減衰に関わる要因</li> <li>・陸地や構造物の存在(アンテナ設置位置,干潟の出現)</li> <li>・電気伝導率と誘電率(淡水影響や海面粗度)</li> <li>・潮位</li> <li>・地球の曲率</li> </ul>
(2) 海面波の発達に関わる要因 ・風速・風向 ・流れ成分との相互干渉
(3) 外来ノイズに関する要因 ・自然ノイズ(空電雑音、宇宙雑音、太陽雑音) ・人工ノイズ(交通機関や電気・電子機器が発する雑音)
(4) その他の要因 ・測定器自身のシステム雑音

ものの,系統だった研究事例がほとんど無く,未解明な 点が多い.これらデータ測得率に関与する要因の影響度 合いに関する知見を集約し,そのデータ特性について理 解することは,海洋レーダを工学分野で実利用する上で 重要となる.

本研究では、VHF帯を用いたDBF海洋レーダ<sup>71</sup>を対象

に、長期の観測データが得られた有明海諌早湾湾口部の 観測結果から、データ測得率に与える要因に関して基礎 的な検討を行う.坂井ら<sup>50</sup>は、同海域におけるDBF海洋 レーダの観測データに関して、秋季と冬季の大潮期を対 象に、外来ノイズの日変動とレーダによる最大探知距離 との関連性について調べた.その結果、外来ノイズの要 因特定には至らなかったものの、秋季は午前7時と午後7 時前後にノイズレベルが10~15dB程度上がり、最大探 知距離に影響を及ぼすこと、冬季のノイズレベルの日変 動はほとんどないが平均ノイズレベルは秋季より大きく なること、干潮時の干潟域の出現と最大探知距離との関 連性は見られないことなどを確認した.しかし、解析を 行った期間が2日間であるため、他の日時でも同様の結 果が得られるのかは不明である.

本研究では、表-1に挙げた要因のうち、(1)伝播中の 電波減衰に関する干潟出現に伴う陸地影響、淡水影響、 および潮位差の影響、ならびに(2)海面波の発達に関す る風の影響と流れ成分との相互干渉の影響について考察 した.図-1に示すように、有明海観測においては、DBF 海洋レーダを雲仙市と荒尾市に設置した.雲仙地点は前 面に高さ約1.5mの防波堤があるが、アンテナの中心高さ が4mであるため、測得率の時間変動には影響はないと 考えられる.一方、荒尾地点には構造物はないものの、 前面が干潟域に面しており、潮位変化に伴い干潟による 減衰影響が考えられる.また、干潮時の干潟出現時でも 最大探知距離が変化しなかったかった<sup>50</sup>ことから、遠方 域でもブラッグ散乱を起こす海面波が存在できる水深が 維持されていると考えられる.

なお、DBF海洋レーダの中心周波数41.9kHzの場合、 地球の曲率の影響<sup>80</sup>は23km沖から現れるが、DBF海洋 レーダの最大探知距離とほぼ近いことから、その影響を 無視した.海面粗度と測定器自身のシステム雑音に関し ては、これらに関する情報が得られなかったため、本研 究では考慮していない.



図-1 諫早湾湾口部の観測領域と水深.

表-2 DBF海洋レーダの諸元.

送信方式	FMICW(*1)
信号処理	DBF(*2)
中心周波数	41.9 MHz
周波数掃引幅	300 kHz
周波数掃引時間	0.33 秒
ピーク出力	100 W
レンジビン分解能	0.5 km
最大レンジ	25 km
速度分解能	2.13 cm/s
ビーム幅	13°-17°
観測時間(*3)	15 分
占有面積	40 m x 7 m
通信機能	FOMA無線通信

\*1: Frequency Modulated and Interrupted Continuous Waveの略 \*2: Digital Beam Forming

\*3: 1シーン(25km四方)の観測に要する時間

#### 2. DBF海洋レーダの概要

今回計測に用いたDBF海洋レーダの概要を表-2に示す. DBF海洋レーダの特徴としては、周波数にVHF帯を採用 しており、HF帯の海洋レーダに比べて空間分解能,速 度分解能の面で高精度の観測が可能である.またデジタ ル・ビーム・フォーミングを用いているため、測定時間 も15分間隔と短い.ブラッグ散乱対象となる観測対象波 浪は波長約3.5mの波浪であり、海面下約30cmの流速を 検知することになる.

#### 3. 諫早湾湾口部の周期的なデータ測得率変動

松山ら<sup>9</sup>は、諫早湾湾口観測において、データ取得数 が潮位とほぼ同期して変動することを両者のコヒーレン スから指摘した.しかしその原因までは検討されていな い.

そこで、まず潮汐に伴ってデータ数が顕著に変動して いた2007年2月19日を対象に、陸地の影響が少ない雲仙 地点のビーム6における1次散乱強度およびノイズ値を算 出し(図-2)、両者のデータ変動に対する影響を検討す る.ここで、ノイズ値は1次散乱強度、ドップラースペ クトルの0Hzのピーク値を除くスペクトルの平均値とし て計算した.

図-2より,潮位(気象庁AMeDAS<sup>10</sup>大浦地点)の変動 に伴って1次散乱強度が変動しているのがわかる.この 変動は最大約60bBにもなっている.さらに全ての距離 で1次散乱強度が変動しているのがわかる.一方,ノイ ズ値は潮汐に対応して変動しておらず,その変動範囲も 小さい.この点は,前述の坂井ら<sup>5</sup>の結果と同様である.

これらのことから, 諫早湾口でのデータ数の周期的変 動は, 外来ノイズに関係なく, 1次散乱強度の低下によ るものである. 以降, 1次散乱強度に影響を与える要因 について検討する.



#### (1) 干潟および潮位差の影響

図-3に、満潮・干潮の前後2時間のデータからそれぞ れデータ測得率を計算し、さらにその測得率の差(満潮 時ー干潮時)を求めた結果を示す.データは、2006年12 月8日から2007年4月18日までの約4ヶ月間のデータを用 いた.データ測得率は、1日において各ビーム方向のレ ンジビンが取得可能なデータ総数に対する実際にデータ が得られた数の割合と定義した.また、図-4に、全受信 ビーム方向に対する視線流速成分のデータ測得率の平面 分布を示す.他のビームに比べてデータ測得率の差が大 きい領域を黒円で囲った.

図-3より, 荒尾地点では, 満潮・干潮のデータ測得率 の差が大きく, 雲仙地点は荒尾地点に比べて差が小さい



図-3 満潮・干潮でのデータ測得率の差と距離の関係.

ことがわかる.この原因として荒尾地点においては,前 面近傍域の干潟の出現時に,初期の伝播損失が大きくな り,雲仙地点に比べてデータ測得率の干満差が大きく なっていると考えられる.これは陸上伝播による電波の 伝播損失が海上伝播に比べてはるかに大きいためである. 実際,荒尾地点の2km付近の結果は干潮時の干潟出現の 影響と考えられる.

また、両地点とも15km付近を境に測得率の干満差が 大きくなっている.特に、荒尾地点のビーム8は10km沖 合付近からその傾向が強くなる.図は割愛したが、両地 点とも沖合15km付近までは満潮時の測得率はほぼ100% であり、水深の変化している15km沖合付近から距離に 応じて直線的にデータ測得率が低下する傾向を示した.



図-4 視線方向のデータ測得率の空間分布.

15km付近以遠でデータ測得率の干満差が大きくなる理由は、既に電波の減衰によりS/N比が低下していることに加えて、図-1に示すように全てのビームにおいて水深が浅くなる領域になっていること、ならびに河口部に近い領域となっており、河川水による塩分低下の影響が考えられる.

水深の浅い領域がレーダに与える影響として,海面波 発達への影響が考えられる.水深が浅くなることで観測 対象波浪の発達・伝播が阻害され,1次散乱強度の低下 を引き起こす可能性がある.小潮時におけるデータの変 動が大潮時ほど大きくないという傾向は,この仮説に合 致している.荒尾地点のデータ測得率は前面の干潟の影 響から小潮時でも潮位に対応して変動していた.しかし, 電波の減衰が水深のみに依存して発生するのならば, 図-2において近距離および水深の深い箇所においても1 次散乱ピークが低下していることは説明出来ない.その ため,水深の観測対象波浪への影響については,検討の 余地がある.

最後に、潮汐変動による海面高さの変化に伴う伝播経路の違いによる損失の可能性であるが、レーダの観測距離が1.5km以遠であるのに対して、水位差は最大でも6mであり、入射角はほとんど変化しないため、後方散乱断面積は変わらない. そのため、海面高さの変化はデータ数に影響を与えていないと考えられる.

以上のことから、データ測得率に対して観測局周辺の 干潟出現による伝播損失の影響が大きいことが確認され た.また遠方域においても水深が急に浅くなる領域では、 干満の測得率差が大きく、その原因として水深が海面波 発達に影響を及ぼすことが考えられる.また、潮汐変動 による海面高さの変化に伴う伝播損失の影響はないと判 断できた.

### (2) 河川水による淡水影響

河川流量が平水時においては、干潮時に引き潮によっ て河川水が海域に移流・拡散することにより海面の塩分 が低下し、海面の電気伝導率が低下することが考えられ る.ここでは、諫早湾湾口北部の竹崎島沖における2007 年6月23日から8月7日までの水質観測結果<sup>11)</sup>より、表層 (水深1m)の塩分データとデータ測得率変化の周期性 との関連性を調べた。

その結果,降雨影響のない平水時の塩分の時系列デー タは、1日の間に値が2psu程度変化するものの、潮位変 動に関連した変化は見られなかった.しかしながら,解 析に用いたデータは、筑後川河口部から20km程度離れ ており、河川水影響が出にくいことも考えられる.実際 に図-4においても、データ測得率に対する干満差による 違いが小さい領域にあたっている.

そこで,濱田<sup>12</sup>が福岡,佐賀,熊本の3県による1972 年から2002年までの浅海定線調査の結果を月平均の空間 分布として示した結果を参照した.その結果,冬季から



図-5 本海域において支配的なM2分潮流の潮流楕円<sup>5</sup>.

春季にかけては、図-4の干満差の影響が大きかった領域 の塩分は、竹崎島沖よりもいずれも小さくなっており、 河川水による影響については、さらにより詳細なデータ による検討が必要であると考えられる.

#### (3) 流れ成分と波との相互干渉の影響

潮流成分が波の発達・変形に影響を与えるとすれば、 潮流の卓越方向およびそれに直交する方向のビームにお いて、測得率に何らかの違いが見られるはずである. そ こで、図-4の結果を、坂井ら5が示した本海域で卓越す る秋季M2分潮流の潮流楕円分布と比較した(図-5). 観測時期は違うが、いずれも非成層期の結果であり、 M2分潮流の特性に大きな変化はないと判断した<sup>12)</sup>.本 海域では長軸に比べて短軸が非常に小さいといった特徴 がある.これらの特徴をふまえ、両地点においてM2の 長軸方向に近い方向ビームと短軸方向に近いビームを比 較する(図-3.4)と、軸方向での優位な差は認められず、 また図-4に黒円示した他のビームより干満の差が大きい 箇所も潮流方向とは関係がない. また潮流が影響を与え るとすれば、取得データ数は潮流の最強時に最大もしく は最小になると考えられるが、取得データ数にはそのよ うな挙動は見られなかった.これらの結果より、本海域 で卓越する潮流成分が、海面波の発達を妨げることはな いと判断できる.

なお,風については,潮汐変動と同期して半日周期で 変動しているとは考えられないので,データ測得率の周 期的な変動に関しては,その影響を無視した.

## 4. 諫早湾湾口部の急激なデータ測得率変動

本章では、海洋レーダのデータ測得率が急激に減少す る場合についての要因を検討する.

#### (1) 降雨による淡水影響

本節では、降雨に伴う河川出水による海域の塩分低下の影響について検討する.



図-6 2006年夏季における雲仙地点, 荒尾地点の視線流速データ数と大浦の潮位(上)および雲仙地点の風速と雨量(下).

図-6に、2006年6月14日から8月13日における、両地点 の視線流速の有効データ数、潮位(大浦),ならびに観 測サイトで取得した風速と雨量のデータを示す.図-6よ り、6月24日前後の降雨の影響で両地点ともデータ数が 減っていることがわかる.また、6月30日から7月4日に かけての雨の後、5日の時点で両地点とも急激にデータ 数が減り、データ数の回復に約5日程度要している.さ らに、7月19日から22日にかけての集中豪雨により、再 び両地点のデータ数は急激な減少を示し、雲仙地点では 23日時点で、機器系統にトラブルが生じた.荒尾地点は、 天気の回復とともに同じく5日程度を要してデータ数が 回復している.

以上の経過から,降雨から1日程度の遅れをもって, 急激なデータ数の低下が起こっており,これは筑後川を はじめとする河川から大量の出水が起こったことで,海 面の塩分低下が生じ,電気伝導率が低下した可能性が考 えられる.著者らは,降雨後の7月6日と7日に有明フェ リーにて現場海域付近を横断した際,海面には風波が発 達している様子を確認したが,受信したドップラー信号 の1次散乱強度は極めて低い値を示していた.ただし、 実際に塩分の平面分布を計測していないため,どの程度 塩分低下が生じているかについては不明である.なお, 淡水影響による誘電率への影響は無視できる<sup>8</sup>.

また、本研究では、測定器自身のシステム雑音を考慮 していないが、23日には降雨が原因と思われる機器トラ ブルを生じており、有効データ数の低下に対するシステ ム雑音の影響についても、今後の課題である.

## (2) 風による影響

内湾域での観測においては、外洋からの波の伝播がほ とんどないため、風は波を発生させる重要な要素である. ここでは、急激なデータ測得率の変動と風の関係につい て考察する.

図-7に、2007年2月27日から3月8日にかけての、両地 点の視線流速データ数、潮位(大浦),観測サイトで取 得した風速・風向のデータを示す.また、両地点の視線 流速から格子データに内挿した流速ベクトル数について も示した.期間中は3月5日の2~3時(9mm/h)を除き、 降雨はない.図-7より、3月2日~4日にかけて各日の深 夜に風が数時間にわたり約1m/sと非常に弱くなっている 期間があり、その時間帯に両地点のデータ数が大きく低 下している.このときは、近距離のデータしか取得でき ておらず、流速ベクトルはほとんど算出できていない. また風速が増加するとデータ数が回復している.

以上の結果,風速が継続して1m/sを下回ると,極端に データ測得率が低下することが確認され,その要因とし ては,ブラッグ散乱を起こす海面波が発達しにくくなる ためと考えられる.

### 5. まとめ

有明海諌早湾湾口部におけるDBF海洋レーダの長期観 測結果から、観測データの測得率に及ぼす要因について 検討した.その結果、以下のことがわかった.

- (1) データ測得率が潮位変動とほぼ同位相で周期的に変化する主要因として、設置局近傍での干潟域の出現による伝播損失の影響が認められた.また水深が観測波の発達に影響を与えている可能性がある.
- (2) データ測得率の周期的な変動に対する、水面変動に よる伝播経路の変化の影響、および流れ成分の相互 干渉による海面波発達に関する影響は見られなかっ た.潮位変動に伴う河川水拡散による塩分低下と電 気伝導率の変化については、その影響を特定するに は至らなかった.
- (3) まとまった降雨後に急激にデータ測得率が低下する ことが確認された.その原因として、河川からの出 水の影響で、表層の塩分低下に伴い電気伝導率が低 下する影響が示唆された.



図-7 2007年春季における流速ベクトル数、雲仙地点、荒尾地点の視線流速データ数と大浦の潮位(上)および風速(下).

(4) 風速が1m/s以下になると、ブラッグ散乱を起こす海 面波が発達せず、急激にデータ測得率が低下する傾 向が認められた.

以上,VHF帯を用いたDBF海洋レーダのデータ測得率 の変動特性と、それに及ぼす影響要因について考察した. 海洋レーダは、長期連続してデータを取得できるポテン シャルを有しているが、自然環境下において、本研究で 述べた様々な要因により、安定してデータを取得できな い場合がある.既に大学や国土交通省などで、海洋レー ダの導入が盛んであるが、海洋レーダをベースとした観 測システムの普及を考える上では、このようなデータ測 得率に及ぼす要因についての知見を集約しておくことが、 実用性および信頼性の上で重要となる.

本研究では、河川出水に伴う塩分低下の実態把握と電 気伝導率低下の直接的な検証、および雨天時の機器のシ ステムノイズ特性などに関して検討の余地が残った. 今 後は、これらの点に関する検討を重ねていく予定である.

謝辞:本研究を行うにあたり、長崎大学の多田彰秀教授 と琉球大学の藤井智史教授には、多くのご助言をいただ いた.また、(株)電力計算センターの山崎健一氏には遠 隔データ取得に際して、ご協力いただいた.ここに感謝 の意を表します.

#### 参考文献

- 佐藤健治、松岡建志、児島正一郎、藤井智史:東シナ海の 黒潮流入部における遠距離海洋レーダ観測,沿岸海洋研究, 第41巻,第2号, pp.119-127, 2004.
- 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.
- 3) 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.

- 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,51, pp.1436-1440, 2004.
- 5) 坂井伸一, 坪野考樹, 多田彰秀, 染谷真作, 竹之内健太, 水沼道博: 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, 水工学論文集, 第51巻, pp.1439-1444, 2007.
- 6) 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.
- 7) 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.
- Fernandez, D.M., Meadows, L.A. and Vesecky V.F., Teague, C.C., Paduan, J.D., Hansen, P.: Surface Current Measurements by HF Radar in Freshwater Lakes, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.25, No.4, pp.458-471, 2000.
- 9) 松山昌史,吉井匠,坪野考樹,坂井伸一,多田彰秀,水沼 道博:VHF帯のDBF海洋レーダによる安定した長期リア ルタイム観測とその有効性,海岸工学論文集,第54巻, 2007(印刷中).
- 10) 気象庁ホームページ:気象統計情報, http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html
- 11) 多田彰秀:私信,2007
- 12) 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.

(2007.9.30受付)