

X バンドレーダによる冬期日本海沿岸海洋観測

小林 智 尚* ・山 崎 将 史**・湯 本 大 輔***
渡 辺 章 人****・安 田 孝 志*****

X バンド海洋観測レーダを用いて日本海沿岸域での冬期定常観測を試みた。観測では機器を中心とした半径約 5 km の領域内での波浪方向スペクトルと海浜流平面流速分布を 1 時間ごとに測定した。その結果低気圧等の通過にともない海上風の風向が大きく変化する時、海浜流の流向や波浪の主波向も短時間で風向と同一方向に変化することが見出された。また海浜流の空間的特徴なども明らかにされた。一方、観測機器としての海洋観測レーダは海洋表層流や波浪方向スペクトルの定常観測は可能で、特に荒天時や高波浪時には良好な観測が行えることが分かった。

1. はじめに

陸上設置型海洋観測レーダはほぼ瞬時に広域の観測が可能な新しいタイプの観測機器であり、このような特徴から近年、国内外でこのレーダによる海洋観測が試みられている(例えば、土木学会研究現況レビュー小委員会, 2001)。

この陸上設置型レーダは対象とする広域の波浪や海洋表層流などが計測できる。このためたとえば、面的に広がりを持つ沿岸流やこれに伴う漂砂現象などの調査・研究に対して有効な情報を提供できる。またこの海洋観測レーダは機器を陸上に設置できるため、機器の設置や維持管理が容易であり、荒天時においても安定した観測が可能である。

本研究では陸上設置型海洋観測レーダの一つである X バンドレーダを用い、冬期日本海の定常観測を行った。そしてこの観測を通して、海洋観測機器としての X バンドレーダの特性や有用性を検証するとともに、観測対象域での波浪や海洋表層流などの海洋現象を面的に捉え、その特徴を検討する。

2. X バンドレーダによる観測

(1) 観 測 機 器

観測には日本無線(株)製の船舶用レーダ JMA-3925-9 を用いた。このレーダの主な仕様を表-1 に示す。この表のように使用したレーダシステムはアンテナ長が 3 m 弱であり、また送受信機の重量も約 44 kg であるため、海洋観測レーダとしては可搬性に優れたものである。

レーダより得られた映像信号をパソコンに取り込むために必要な A/D 変換器には 12 bit 階調、変換周波数 20 MHz の超高速 A/D 変換器を用いた。

表-1 レーダシステムの主な仕様

項目	仕様
アンテナ長	9 フィート (2,734 mm)
アンテナ回転速度	約 20 rpm
アンテナ回転角分割	0.175° (1 周 2048 分割)
水平ビーム幅	0.8°
送受信周波数	9410±30 MHz
送信パルス幅	0.08μs (最小、計測時の設定)

この X バンドレーダによる海洋観測システムの計測分解能は表-1 に示すレーダの仕様によりほぼ決定される。本研究で用いたレーダシステムでは、アンテナを中心とした空間で、レーダビーム視線方向の分解能は 12 m、回転方向は 0.8° である。また時間分解能はアンテナの回転速度より約 3 秒である。一方、データのサンプリング間隔はこのレーダの空間分解能より高く、視線方向に 7.5 m、回転方向は 0.175° である。また時間間隔は時間分解能と同じく約 3 秒である。

(2) 観測場所・期間

観測は 2001 年 11 月 27 日から 2002 年 2 月 24 日までの約 3 ヶ月間、新潟県大潟海岸の京都大学防災研究所大潟波浪観測所にて行った。図-1 にこの観測域周辺の地形図を示す。この図に示すように、対象海域はほぼ直線海岸で岸沖方向海底勾配もほぼ一様である。X バンド海洋観測レーダシステムは波浪観測所所有の観測棧橋の先

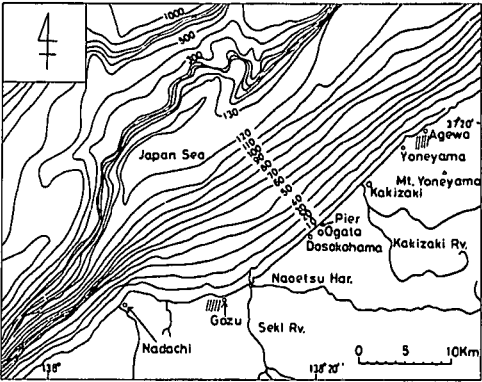


図-1 大潟周辺の海底地形

* 正会員 工博 岐阜大学助教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
** 工修 敦賀市役所
*** 岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻修士課程
**** 海津町役場
***** 正会員 工博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

端に設置した。表-1でも示したように、Xバンドレーダは機器が小型であるため桟橋先端にも容易に設置可能である。対象領域はレーダアンテナを中心とした半径9 kmの領域とした。ただし解析結果を考察する際に述べるが、実際に解析可能なデータが取得できた領域はこの対象領域よりも小さくなっている。観測の結果得られたレーダ画像の一例を図-2に示す。この図の中心にアンテナが位置しており、図の上側が海域、下側が陸域である。この図の中心拡大図(b)から分かるように、XバンドレーダをT字型の観測桟橋先端に設置したため、設置点は汀線から約300 m沖に位置している。またマイクロ波散乱強度の強い領域は濃く示されており、海域で見られる縞状の強散乱領域は波峰に対応している(小林ら, 2002)。図-2(a)の全体図ではアンテナ近傍の地点のみに海洋波浪に対応する縞状の映像(シークラッター)が見られる。これはレーダで受信される海面散乱電磁波は距離の

4乗で減衰するため、遠方からの散乱波は極めて微弱になるためである。ただし、図中で縞状の映像が確認できない領域でも受信データには波浪の映像が含まれている。

観測は毎正時に約3分30秒間行った。そしてレーダシステムで得られた連続レーダ画像を解析することで1時間ごとの計測対象領域内の表層流速分布と波浪方向スペクトルを推定した。また、参照のために桟橋先端に設置してある風向風速計と波高計による同時計測も行い、計測結果はレーダによる観測結果との比較・検討に用いた。

(3) 解析手法

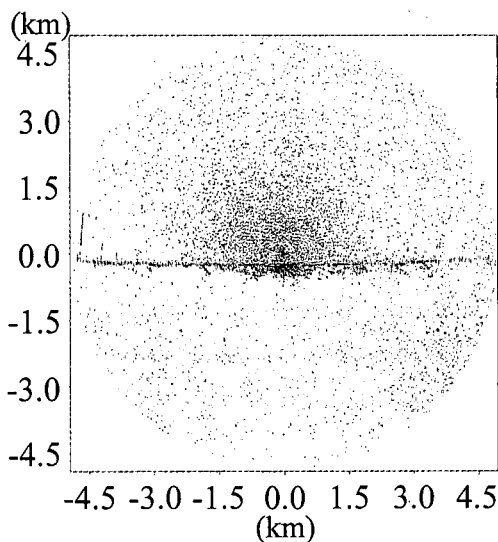
今回の観測では、Xバンド海洋レーダによる計測結果から観測対象領域内での波浪方向スペクトルと海洋表層流速分布を推定した。推定方法はNieto-Borge *et al.* (1999)によって提案された手法を用いた。この手法はレーダによって得られたシークラッターの連続画像を時空間方向にフーリエ変換し、微小振幅波理論をもとに波浪方向スペクトルと海洋表層流速を推定する手法である。今回は計測対象領域を分割し、岸沖方向・沿岸方向ともに375 m間隔で方向スペクトルと海洋表層流速を求めた。ただし以下に示す波浪方向スペクトルは汀線より沖2.0 kmを中心とする複数領域で推定された結果の平均値である。

これらレーダ画像を解析する上で必要な海底地形データには日本海洋データセンター(JODC)によって提供されたデータを用いた。

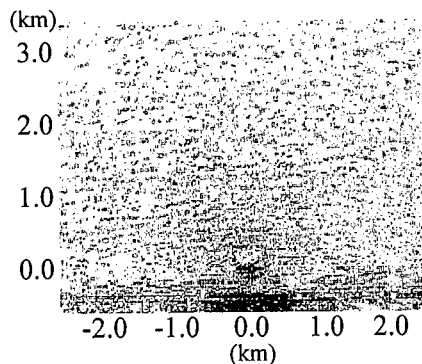
3. Xバンドレーダによる観測結果

本研究で行った観測結果の一例として2001年11月27日21時に観測された波浪の方向スペクトルと海浜流流速分布を当時の天気図とともに図-3に示す。図中、汀線に垂直に入射する方向を方向角ゼロとし、時計まわりを正の方向角とした。また他の波高計による当該観測領域での同時観測データが得られず、レーダ観測で得られた波高推定値のキャリブレーションが行えなかった。そのため本研究では波浪の方向スペクトルをピーク成分で無次元化した方向スペクトルを示す。一方海浜流流速分布図では汀線からの岸沖方向距離を縦軸に、またレーダアンテナを中心とした沿岸方向距離を横軸に表示している。Xバンドレーダによる観測結果の妥当性については、小林ら(1999, 2001)によって検討されており、その観測結果は従来の波高計などの観測結果とよく対応していることが確認されている。したがって今回はこのXバンドレーダによる観測データの妥当性については検討しない。

図-3(a)の天気図からわかるように、当時は東シナ

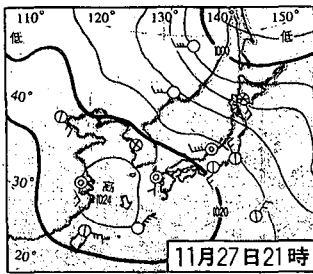


(a) レーダ画像全体図

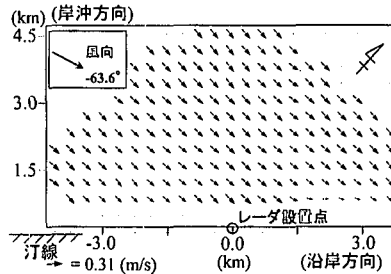


(b) 中心拡大図

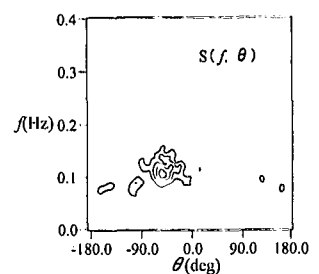
図-2 レーダ画像の一例



(a) 天気図



(b) 海浜流速分布



(c) 方向スペクトル

図-3 レーダによる観測結果の一例 (2001年11月27日21時)

海に高気圧、オホーツク海に低気圧が位置し、観測地点ではほぼ西からの風が発生していた。Xバンドレーダによる観測結果では図のように、この海上風と同方向の西からの波浪が卓越、海浜流も西向きで、海岸には約45°の角度で入射していた。

このように、海浜流流速分布の流向や波浪方向スペクトルの主波向と海上風風向との間には関係があるように見られた。そこでここではXバンド海洋観測レーダによって得られた海浜流流速分布と波浪方向スペクトルの、海上風風向への追従性について検討する。

冬期の日本海では季節風が卓越しているため、観測対象海岸では図-3の観測時と同様に、通常西からあるいは北西からの海上風が計測される。しかし低気圧や前線の通過などにもとない海上風の向きが大きく変化することがある。その一例として2001年12月6日19時から翌日0時までにXバンドレーダによって観測された海浜流流速分布と波浪方向スペクトルを、観測桟橋先端での風向風速計の計測結果とともに図-4、図-5に示す。図-3と同様、これらの図でも、海浜流流速分布の縦軸と横軸はそれぞれ汀線からの距離とレーダアンテナからの沿岸方向距離を表しており、また波浪スペクトルの方向は汀線垂直入射方向をゼロとしている。この期間には図-4、図-5の海上風の計測結果に示されるように、風向きが西から北に、観測対象海岸では沖左側から沖右側に、時間とともに変化した。この海上風の風向変化に追従して海浜流流速分布や波浪方向スペクトルもその流向や主波向が対象海岸に対して沖左側から右側に変化していることが図-4、図-5でわかる。この様に低気圧などの通過に伴う海上風の風向変化に対して、海浜流の流向や主波向も比較的良く追従して変化する様子は、図-4、図-5に示した2001年12月6日だけではなく、観測期間中何度か見られた。

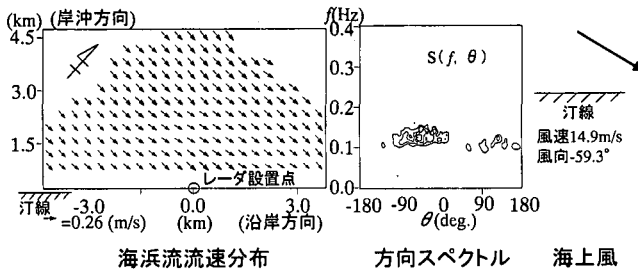
海浜流流速分布では、図-4にも見られるように、海上風と同じ方向に汀線に斜めに流入する海浜流が汀線近傍で汀線と並行になる方向に流向を変化させているようが見られた。また海上風風向変化に伴う流向変化がある

にもかかわらず、上記の点を除いて、海浜流の流速流向は計測対象領域内でほぼ一様であった。このように、海浜流流速分布に大きな特徴がなく一般的な流速分布になったのは観測対象領域の海底地形に起因すると考えられる。対象領域の海底地形は図-1に示すように、沿岸方向に一樣で岸沖方向にも一樣勾配となっており、このような単純な海底地形であるため、海浜流の空間流速分布にも観測対象海岸固有の大きな特徴が現れなかったものと考えられる。

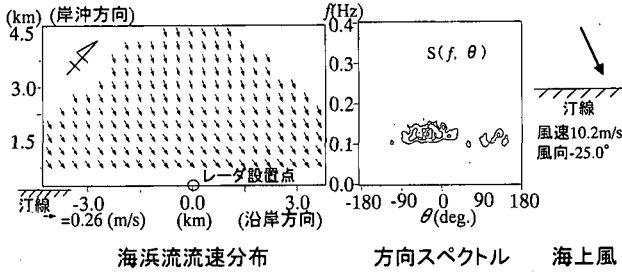
波浪の方向スペクトルも、図-4の12月6日23時のように、海上風風向変化に伴う主波向変化時などでは波浪の方向集中度が低いスペクトル形を示す様子が見られたが、一般には標準的な波浪スペクトル形を示していた。これは対象とする冬期日本海は季節風が卓越しており、海上風がほぼ一様であるためであると考えられる。

観測期間中、シークラッターが弱く、データを取得できない場合があった。図-6に海上風速に対するレーダ波浪観測可否頻度分布を示す。この図のように、今回の観測では海上風の風速が4 m/s以下では海面での電磁波散乱強度が不足してレーダによる海洋観測が行えないケースが多いが、この風速が7 m/s以上であれば、おおむねレーダによって観測・解析可能な海面電磁散乱波が得られている。このように一般に海上風の風速が小さい時にはレーダによる海洋観測はできなかった。Reichert *et al.* (1997) もXバンド船舶用レーダによる海洋観測では数 m/s以上の海上風が必要であるとしている。今回の観測でレーダ海洋観測に必要な海上風の風速がReichert *et al.*が指摘した値より大きくなっているのは、レーダアンテナの設置高などが彼らと異なっていたためである。このことから、より良好な条件で観測が行えるよう今後検討が必要であろう。

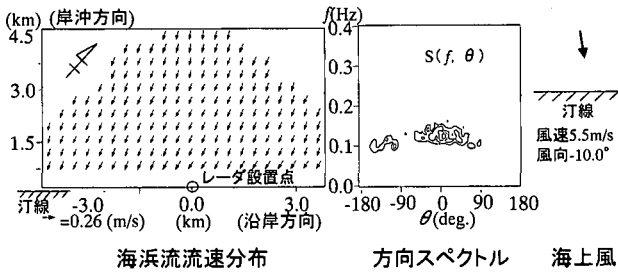
一方、高波浪時や荒天時には良好なシークラッターが取得できた。これは小林ら (2002) が示したように、海上風の風速が大きい時などには波峰部に擾乱による凹凸や白波砕波が発生し、電磁波を強く散乱させるためである。このことから、Xバンド海洋観測レーダは特に高波



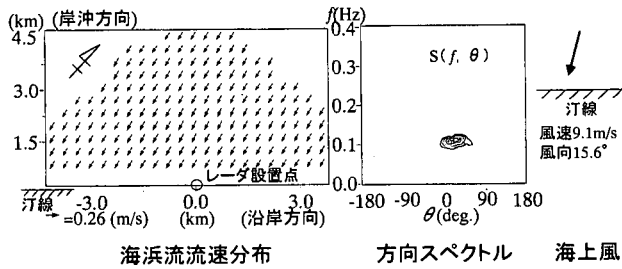
(a) 2001年12月6日19時



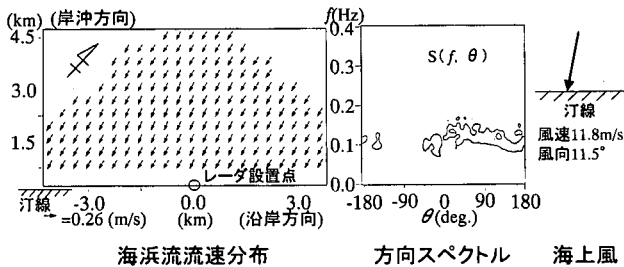
(b) 2001年12月6日20時



(c) 2001年12月6日21時

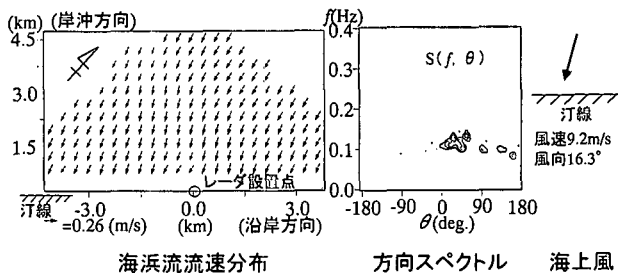


(d) 2001年12月6日22時



(e) 2001年12月6日23時

図-4 Xバンドレーダによる観測結果



(f) 2001年12月7日0時

図-5 Xバンドレーダによる観測結果(つづき)

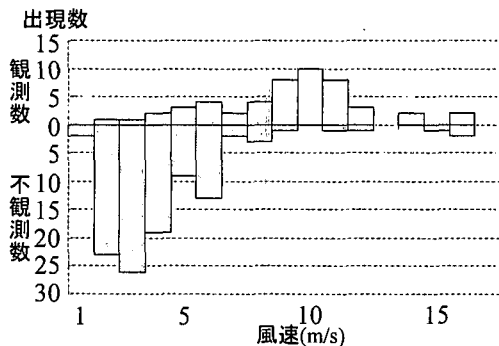


図-6 海上風速に対するレーダ波浪観測可否頻度分布

浪時や荒天時での海洋観測に適している。

4. おわりに

本研究では陸上設置型のXバンド海洋観測レーダを用いて冬期日本海の定常観測を行った。この観測は、Xバンドレーダの海洋観測への適用性の確認、およびレーダによる冬期日本海の波浪や海浜流の特徴の解明を目的とした。このXバンドレーダにより、対象領域となる半径約5 kmの範囲ではほぼ連続して波浪方向スペクトルと海浜流の流速分布を捉えることができた。欠測はとくに海上風低速時に見られ、シークラッターが弱いことが原因であった。逆に高波浪時や荒天時には良好なシークラッターが受信できた。これより、Xバンドレーダは海洋観測レーダとして利用可能であることを示すことができ、とくに高波浪時や荒天時に有効であることが分かった。

新潟県大潟海岸の京都大学防災研究所所属大潟波浪観測所近傍の波浪や海浜流は海上風風向変化に対して比較

の高い応答性で、主波向や流向を変化させていた。方向スペクトルは主波向変化時に波浪の方向集中度が下がるものの標準的な方向スペクトル形を示していた。また海浜流は汀線付近で汀線に平行な方向に流向を変化させるものの、計測対象領域全体でほぼ一様な流れを示していた。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究C(2)(14550511)および(財)中部電力基礎技術研究所研究助成による成果であることを付記し、ここに深謝する。また、本研究を行うにあたり京都大学防災研究所の山下隆男先生、加藤茂先生、内山清先生には大潟波浪観測所使用やデータ提供など大変協力頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 土木学会研究現況レビュー小委員会 (2001): 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会, 212 p.
- 小林智尚・河合篤司・小塚将之・安田孝志 (2001): Xバンドレーダによる沿岸域の観測, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1431-1435.
- 小林智尚・河合篤司・小塚将之・安田孝志・後藤真太郎 (1999): Xバンドレーダによる波浪場・広域海浜流場の観測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1331-1335.
- 小林智尚・山崎将史・加藤智也・安田孝志 (2002): 風波のマイクロ波ドップラー散乱特性に関する室内実験, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1501-1505.
- Nieto-Borge, J. C., K. Reichert, J. Dittmer (1999): Use of nautical radar as a wave monitoring instrument, Coastal Engineering, Vol. 37, pp. 331-342.
- Reichert, K., J. C. Nieto-Borge and J. Dittmer (1998): WaMoS II: An operational Wave Monitoring System, Proceedings of Oceanology '98, pp. 455-462.