

X バンドレーダによる沿岸域の観測

小林 智 尚*・河 合 篤 司**・小 塚 将 之***・安 田 孝 志****

1. はじめに

海洋沿岸での波浪観測等において、陸上設置型レーダはほぼ瞬時に広域の波浪などの海象現象を把握できるなど、従来の観測機器にない大きな特徴を備えている。このため近年、国内外において陸上設置型レーダによる海洋観測が試みられている(たとえば、徳田ら, 2000)。しかしながら、この X バンドレーダによる海洋観測では得られる信号が映像であるため、この映像にはさまざまな沿岸水理現象が視覚的に含まれている。さらにこのレーダ画像が連続的に取得できるため、それらを解析することによりさまざまな現象を動的に捉えることも可能となる。そこで本研究では、X バンドレーダを用いて沿岸海洋観測を行い、従来行われている波浪方向スペクトルや海洋表層流だけでなくさまざまな沿岸水理現象を、観測で得られたレーダ画像から抽出し解析を行った。

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。主な仕様を表一に示す。表より、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高速 A/D 変換器には GKSS 製の WaMoS II を用いた。この A/D 変換器は 8 bit 階調、変換周波数 32 MHz のレーダ画像取り込み専用 A/D 変換器である。

この X バンドレーダ海洋観測システムの計測分解能は主にレーダの仕様により決まる。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、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

表一1 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	0.08 μs (最小, 計測時の設定)

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、アンテナ視線方向 4.7 m、回転方向 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。

計測では 1 送信パルスごとに視線方向に 512 データ取得することにより、アンテナを中心に半径約 2.4 km の空間を観測領域とした。

(2) 観 測 場 所 ・ 期 間

本研究の観測は 2000 年 10 月 23 日に港湾空港技術研究所波崎海洋波浪研究施設にて行った。当日はやや強い風が吹いており、時折小雨が降っていた。

海洋観測レーダのアンテナはこの研究施設の、海面より高さ約 17 m の地点に設置した。このようにアンテナを高所に設置することにより、直進性が強い X バンドの電磁波でも半径約 2.4 km の領域内の波浪を観測することができた。観測の結果得られたレーダ画像の一例を図一に示す。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。図中、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。

計測は 10 時から 14 時まで毎正時から約 38 分間行い、1 回の計測で連続レーダ画像を 780 枚取得した。また観測桟橋先端に設置してある超音波式波高計による同時計測も行い、レーダによる観測結果と比較・検討した。

3. X バンドレーダによる観測結果

(1) 方向スペクトル・沿岸流

X バンドレーダによって得られた映像データから波浪の方向スペクトルや沿岸流の平面流速分布の算定は、Reichert ら (1998) や小林ら (1999) によって既に試み

* 正 会 員 工 博 岐阜大学大学院助教授 工学研究科環境エネルギーシステム専攻
** 学生会員 工 修 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻
*** 工 修 五洋建設(株)
**** 正 会 員 工 博 岐阜大学大学院教授 工学研究科環境エネルギーシステム専攻

られている。このうち小林ら (1999) は取得データ量の制約から、波浪の方向スペクトルや沿岸流の平面流速分布の推定に時間的に連続するレーダ画像 2 画面分のみを用いて解析している。しかし映像にはノイズが多く含まれており、この手法では精度の高い推定が困難である。実際、Seemann ら (1997) はこのレーダ画像に含まれる情報のうち、半分以上がノイズであることを示している。

一方、本研究では十分な量のレーダ画像データを取得できたので、ここでは Reichert ら (1998) の手法を試みる。この手法では時間的に連続するレーダ画像データを位置 (x, y) 方向および時間方向 t にフーリエ変換を施し、波数ベクトル $k=(k_x, k_y)$ および角周波数 ω で表される 3 次元スペクトルを得た後、海洋表層流速 $U=(U_x, U_y)$ も考慮した微小振幅波の分散関係式

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kh)} + k \cdot U \cdots \cdots (1)$$

を適用して海洋表層流速と波浪の方向スペクトルを推定する。ここで波数 $k=|k|$ である。この手法の詳細は研究現況レビュー小委員会 (2001) を参照されたい。

本研究では図-2 に示す、6 領域において波浪の方向スペクトルを推定した。それぞれの領域は 600 m 四方であり、約 6 分 24 秒にあたる 128 画面の連続レーダ画像を解析に用いている。

この対象領域での波浪方向スペクトルの推定結果を図-3 に示す。この図はそれぞれの地点で推定された 10 の方向スペクトルの平均値であり、方向角は北から時計回りとしている。またアンテナの回転速度より、最大周波数は約 0.167 Hz である。図では推定されたスペクトルをそのピーク値で無次元化している。この図に示すとおり、どの地点においてもピーク周波数約 0.1 Hz、主波

向 252° であるが、岸に近づくにしたがって浅水化のため、スペクトル強度がピーク成分に集中し、スペクトル形状が先鋭化していることが分かる。またこの海岸はほぼ直線海岸であるため、図-3 で見られるとおり、沿岸方向には方向スペクトルの大きな変化は見られなかった。

ここでレーダ画像より得られた波浪の方向スペクトルを棧橋先端に設置された超音波式波高計による計測結果と比較することにより、その妥当性を検証する。超音波式波高計設置点に最も近い図-2 の No. 5 の領域で得られた方向スペクトルを周波数スペクトルに変換して、超

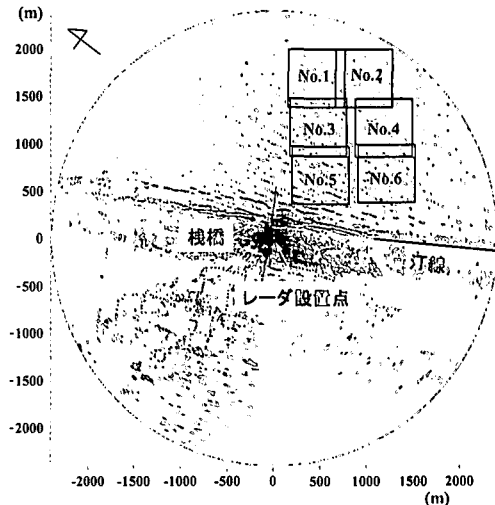


図-2 方向スペクトル推定領域

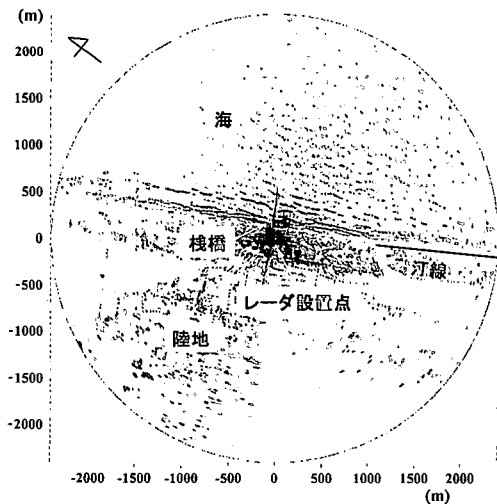


図-1 シークラッタ画像の一例

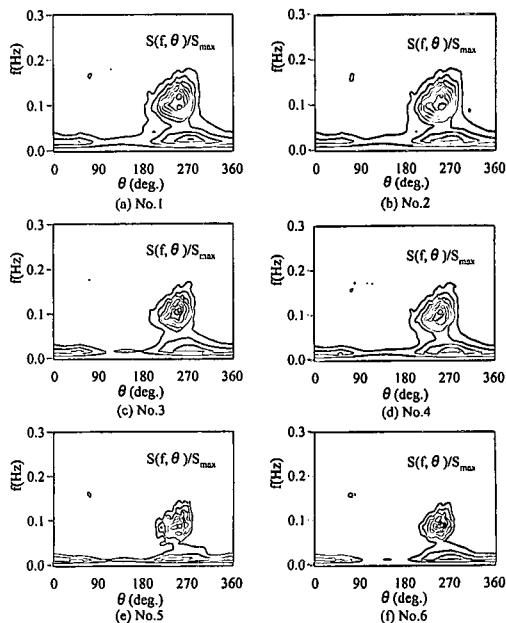


図-3 推定された方向スペクトル

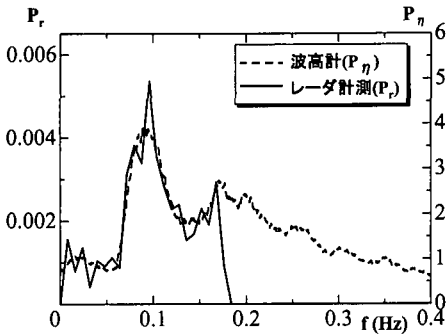


図-4 レーダ計測による周波数スペクトルと超音式波高計による結果との比較

超音式波高計で得られた周波数スペクトルと比較した。その結果を図-4に示す。映像レーダによる計測ではスペクトル強度を定量的に推定することができないので、図中ではスケールを調整している。また、アンテナ回転速度の制約から0.167 Hz以上の高周波成分が計測できない。Xバンドレーダによる計測ではこのような問題点はあるものの、このレーダによって得られた波浪のスペクトル形状は波高計による計測結果と良く合致しており、この計測システムの有効性を示している。

つぎに沿岸流の表層流速分布を推算した。推算手法や条件などは波浪の方向スペクトルの推算とほぼ同じである。推算結果を図-5に示す。図中、流速の推算は300 m間隔で行っている。このレーダによる観測結果を検証するための流速計などによる同時観測は今回行っておらず、この観測結果が妥当であるかどうかは示せない。

この図では右から左に汀線に沿う流れが推算されている。しかし汀線近傍では岸向きの大きな流速が推算されている。これは砕波前後の非線形性の強い波浪に対して、式(1)に示す微小振幅波理論を適用してしまっている、あるいは解析領域の一部に陸域が含まれてしまっている

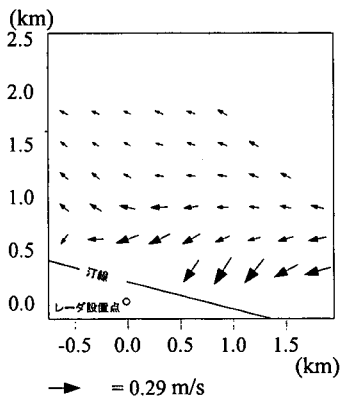


図-5 得られた沿岸流表層流速分布

る、などのために誤推定が行われたと考えられる。

(2) 砕波帯・汀線の検出

Xバンドレーダは映像レーダであるので、マイクロ波の反射率の異なる物体の存在や現象の空間分布をとらえることができる。小林ら(2000)は室内実験によって、砕波前の波に比べて砕波後の波は特にボア領域でマイクロ波を強く散乱することを示している。そこでこの特性に着目して、ボアが存在しマイクロ波の散乱強度が大きい砕波帯をレーダ画像から検出する。観測されたレーダ画像を時間平均して得られたのが図-6である。この図では、平均操作により、個々の波の波峰線が消去されている。桟橋近傍を拡大した図を図-7に示す。これらの図では砕波帯など、ボア存在する領域が輝度値の高い領域として濃く表現されている。図-7は、観測時には汀線より約200 m沖の地点で一度砕波した後、汀線より約100 mの地点で再び砕波する二段砕波であったことを示している。実際、目視による観測でも二段砕波が観測されている。図-6ではマイクロ波散乱波の距離減衰のために、レーダ設置点から遠ざかるに従って、散乱強度も減衰しているが、汀線に沿ってほぼ一様な砕波帯が形成されていることが分かる。しかし拡大された図-7ではこの砕波帯の位置が100 mスケールで沿岸方向に若干の不均一となっていることが分かる。

さらに図-7の散乱強度の岸沖分布を海底地形とともに図-8に示す。マイクロ波散乱強度は距離減衰により沖に行くに従って微弱になるが、この図ではこの距離減衰に重なって砕波帯などの強散乱域が現れている。この図では二段目の砕波によって生じる散乱強度の大きい領域から汀線までの間の領域にも散乱強度が極大となる部分が二つ存在していることがわかる。これは、沖側の極大が砕波直後の強い散乱領域を示しているのに対し、岸側の極大は遡上域においてボアが長時間存在するため、平均散乱強度が大きく現れたものと考えられる。またこの図から一段目の砕波が汀線より約250 mの地点に存在するバーによって生じていることも分かる。

このように、砕波により生ずるボアでのマイクロ波散乱特性を考慮することにより、このボアの発生部分を検出することができた。

(3) 砕波帯や遡上域の時間変動

つぎに、個々の波の砕波や遡上の様子を得られたレーダ画像上で追跡することにより、砕波帯の位置や遡上域の時間変動を調べる。

図-9は、連続する各レーダ画像内から汀線に直角な岸沖方向のライン画像を取り出して、それを並べたものである。図中、横軸は時間、縦軸は岸から沖方向への距離である。また散乱強度が大きいボア領域などは濃く示されている。この図から個々の波が第一砕波点で砕波し

て、散乱強度の大きいボアを形成したあと、波が再生し、第二砕波点で再度砕波してボアを再形成し、遡上して遡上最高到達点に達する様子が読み取れる。また第一、第二砕波点の位置や遡上最高到達点の位置の時間変動も見られる。このうち第一砕波点は岸沖方向約200 mから350 m程度の幅でその位置が周期数十秒程度で岸沖方向に大きく変動していることがわかる。これに対して岸沖方向約100 m付近で発生する第二砕波ではその砕波点位置があまり変動していない。また最高遡上点の位置も約10秒程度で岸沖方向にわずかに変動していることがわかる。このような砕波点などの位置の時間変動は武若・中村・三崎(2000)が行った係留ビデオシステムによる観測でも確認されている。彼らはこの位置の変動を水位の時間変動と比較し、砕波点位置の変動などが個々の波

の大小のみで決まるのではなく、波の連にも関連していることを指摘している。

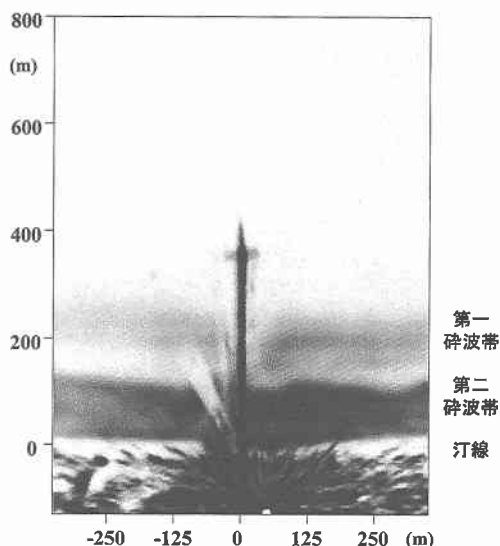


図-7 図-6の拡大図

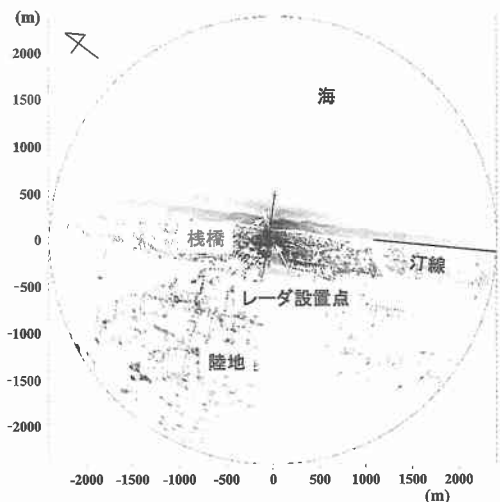


図-6 時間平均処理によって得られたレーダ画像

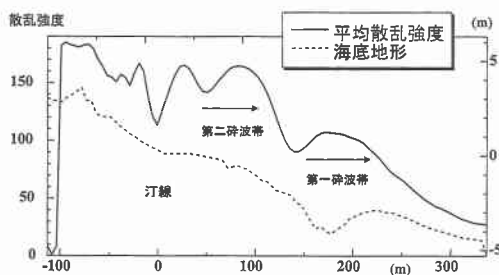


図-8 マイクロ波散乱強度の岸沖方向分布

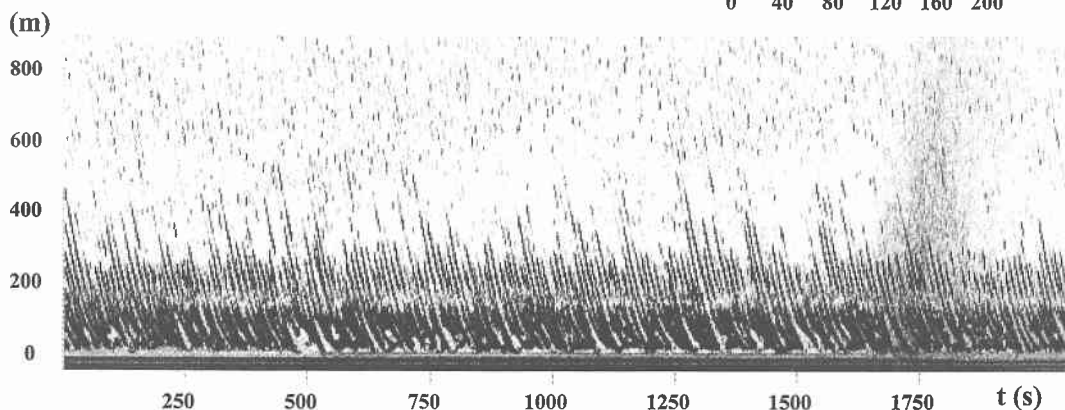
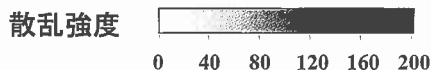


図-9 岸沖方向ライン画像

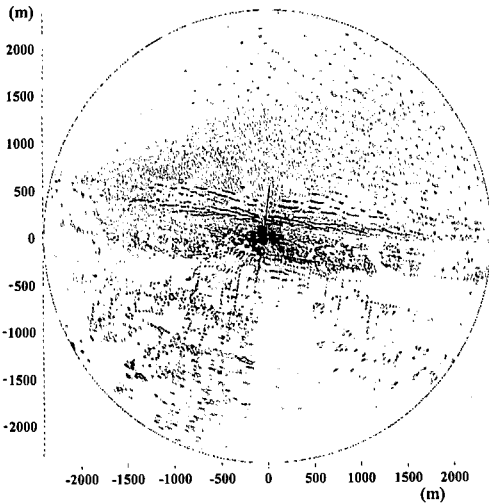


図-10 降雨時に得られたレーダ画像

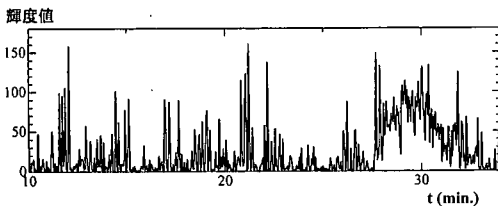


図-11 レーダ画像輝度値の時系列データ

(4) 雨域の検出

今回の観測期間中、一時的に強い降雨が観測された。強い降雨が観測された時点でのレーダ画像の一例を図-10に示す。この図を、降雨が観測されなかった図-1と比較すると、図-10では左から右上にかけて散乱強度の大きい領域が見られる。Xバンドの電磁波をはじめとする波長の短い電磁波は、大気中の水滴によっても散乱する。したがってこの散乱強度の大きい領域は降雨域の雨滴が存在する領域であると考えられる。実際、この領域は時間とともに南西から北東に移動しており、またそれと同時に降雨にも変化が見られた。これより、Xバンドレーダによって、局所域の雨域の検出も可能である。

つぎに、観測機橋先端付近の地点における、レーダ画像の輝度値の時系列データを図-11に示す。図中の時間軸上において、30分前後の時刻で強い降雨が観測されており、この降雨がレーダ画像では輝度の平均値を上げる形で現れていることがわかる。さらにこの図では降雨が観測された期間でも、波浪による輝度の変動も現れていることもわかる。これは、降雨によって現れたレーダ画像内の輝度の高い領域内では、波浪による反射波の情報が埋もれてしまうのではなく、雨滴による反射・散乱波

と波浪による反射・散乱波の情報が重ね合わせの状態ではレーダ画像の輝度として現れていることを表している。また波浪と雨域の時空間スケールを比較すると、一般には時間スケール、空間スケールともに波浪に比べて雨域が十分大きい。これより、レーダ画像データから波浪成分と雨域の成分を分離して抽出することが可能であり、局所的な雨域の挙動の検出も可能である。

4. おわりに

本研究では船舶用Xバンドレーダを用いて沿岸域の水理現象の検出・推定を試みた。その結果、従来の海洋観測レーダでも行われている波浪の方向スペクトルや沿岸表層流の平面分布の推定では、浅水変形による波浪の方向スペクトルの変化や、300 m 間隔の沿岸流速分布推定など、高い空間分解能でこれらの値を推定できることが確認された。また、このレーダが映像レーダであることを活用して、砕波帯位置などの検出を試みた。その結果、本研究では海洋観測レーダにより観測時に現れた二段砕波とその空間分布を検出することができた。またボアなどはマイクロ波の散乱強度が強いいため、この強散乱領域を追跡することによりこの砕波点の位置や波の遡上最高点位置の時間変動なども検出することができた。

謝辞：本研究では、港湾空港技術研究所の柳嶋慎一、内山雄介両研究員、筑波大学の武若聡助教授、日本無線(株)の松野達夫氏、立正大学の後藤真太郎教授に多大なる支援を頂きました。また本研究は文部科学省科学研究助成金奨励研究 A (課題番号 12750459) および(財)中部電力基礎技術研究所研究助成によって行われました。ここに謝辞を表します。

参考文献

- 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・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・河合篤司・小塚将之・山崎将史・安田孝志 (2000): 海洋波浪からのマイクロ波散乱特性に関する室内実験, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1321-1325.
- 武若 聡・中村 崇・三崎尚一郎 (2000): 係留ビデオシステムを用いた砕波帯水理現象の解析, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 126-130.
- 徳田正幸・福田幸司・茂崎慎治・村嶋陽一・金津伸好・八木 宏 (2000): VHF 海洋レーダ観測による播磨灘の表層流特性, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1366-1370.
- Reichert, K., J. C. Nieto Borge, J. Dittmer (1997): WaMoS II: An operational wave monitoring system, Wave 97 Proceedings.
- Seeman, J., F. Ziemer and C. M. Senet (1997): A method for computing calibrated ocean wave spectra from measurements with a nautical X-band radar, Proc. of Ocean '97.