

X バンド海洋観測レーダシステムの観測高精度化の試み

小林 智尚*・中村 敦**・安江 尚貴***・安田 孝志****

X バンド海洋観測レーダの計測精度向上を目的として、アンテナ回転速度の向上と解析部への非線形最小自乗法導入を試みた。アンテナ回転速度を従来の 20 rpm から 40 rpm へ向上させることにより観測可能波浪成分帯の高周波数側上限が周期 6 秒から 3 秒へと拡張され、エイリアシング抑制効果も含めて、より高品質の連続シークラッター画像の取得が可能となった。また非線形最小自乗法採用によってより高精度な海洋表層流速の推定が可能となった。ただし推定条件によっては誤差が増大したり発散することを確認された。改良を行なった海洋観測レーダで沿岸波浪観測を実施し、測定・推定結果から本研究で行なった改良の有効性を議論した。

1. はじめに

X バンド海洋観測レーダは波浪方向スペクトルや海洋表層流速分布を計測対象とし、対象領域をほぼ瞬時に面的に計測できる、陸上からリモートに計測できるため機器設置や維持管理が容易、など、従来の観測機器にはない大きな特徴を備えた新しいタイプの観測機器である。そしてこれらの特徴により、海洋・沿岸域での大規模現象の観測や高波浪時・暴風時の観測などにきわめて有利な計測器でもある。現在この海洋観測レーダに関する研究が国内外で進められており（例えば、Reichert ら、1999；武若ら、2003；小林ら、2002）、またその一方で実際の計測にも活用されている（例えば、Borge ら、2000；高野ら、2004）。しかし X バンドレーダの画像には波浪情報と同程度以上のノイズが混入しており、波浪統計量を推定するうえで精度上の大きな問題となっている。このためこのレーダの活用は未だ限定的である。

そこで本研究ではより高精度に波浪統計量を推定できる様この手法を見直し、ハードウェアおよびソフトウェアの両面から改良を試みた。

2. X バンド海洋観測レーダ

本研究は従来の X バンド海洋観測レーダを見直し、海洋表層流や波浪方向スペクトルをより高精度に推定することを試みた。ここでは従来のレーダについて述べる。

海洋観測レーダは大きく船舶用 X バンドレーダ、高速 A/D 変換器、制御解析用パソコンで構成されている。本研究で用いた船舶用 X バンドレーダは日本無線（株）製レーダ JMA-3925-9 である。このレーダは送信パルス幅 $0.08\mu\text{s}$ （波浪観測時）、アンテナ長さ 9 フィート（2734 mm）、アンテナ回転速度 20 rpm、であるので、これより

視線方向距離分解能は約 12 m、方向分解能は約 0.8° 、時間分解能は 3 s である。このレーダから出力される画像は現在、サンプリング周期 20 MHz の A/D 変換器を介してパソコンに取得される。またレーダの方向分割数が 2024 方位であるので、取得される画像データの間隔は、視線方向間隔 7.5 m、回転方向間隔約 0.176° 、時間間隔 3 s である。この分解能あるいは間隔で取得されたレーダ画像データはパソコンで処理され、海洋表層流速や波浪方向スペクトルが推定される。

海洋表層流速や波浪方向スペクトルの推定では、時間的に連続した X バンドレーダ画像中のシークラッター画像を用いる。この連続したシークラッター画像を空間・時間方向にフーリエ変換し、波数ベクトル $\mathbf{k}=(k_x, k_y)$ および角周波数 ω を軸とするスペクトル空間上のデータに変換する。そしてこのデータに海洋表層流速ベクトル $\mathbf{U}=(U, V)$ を考慮した微小振幅波の分散関係式を

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

にあてはめ、表層流速ベクトル $\mathbf{U}$ を推定する。ここで $k=|\mathbf{k}|$, h は水深である。

式(1)はスペクトル空間上で図-1 に示す局面を形成している。この曲面全体の傾きが流速 $\mathbf{U}$ に対応している。この流速推定には一般に線形最小自乗法が用いられている。図-1 中の分散関係を表す曲面が特定された後、シークラッター画像のスペクトル成分のうち、この曲面上に位置するスペクトル成分が波浪の水面変動成分に対応していると考え、この曲面上のスペクトル成分のみを抽出し、推定波浪方向スペクトルとしている。

Seemann ら (1997) はシークラッター画像の方向スペクトル成分のうち、波浪の方向スペクトル成分と見なせる成分は 3 分の 1 程度であると報告している。つまり多くのノイズ成分を含む中から適切に海洋表層流速および波浪方向スペクトルを推定する必要がある。したがって X バンドレーダによる海洋観測の精度を向上させるには、X バンドレーダで取得されるシークラッター画像デー

* 正会員 博(工) 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

** 未来工業(株)

*** (株)新日

**** 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

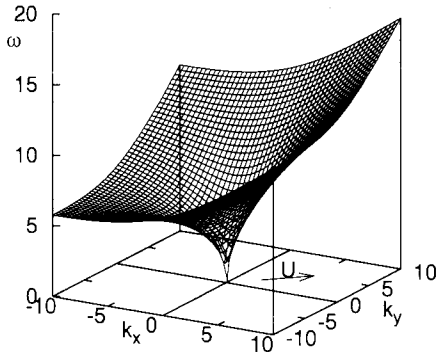


図-1 スペクトル空間上の波浪の分散関係

タの質を向上させると共に、推定精度のより高い手法を導入する必要がある。

3. レーダシステムの改良

(1) 現行レーダシステムの問題点

船舶用 X バンドレーダを転用している現状の海洋観測レーダでは前節で示した通り、連続シークラッター画像のデータ間隔が視線方向 7.5 m あるいは回転方向約 0.176° に対して、時間間隔 3 s と、時間間隔が大きくなっており、これが観測データの品質に直接影響をおよぼしている。

2000 年 10 月 23 日に運輸省港湾技術研究所（現、独立法人港湾空港技術研究所）波崎海洋波浪研究施設において現状のレーダシステムで観測された波浪スペクトルを、超音波式波高計による観測結果とともに図-2 に示す。この図では周波数 0.167 Hz 以下の領域では、X バンド海洋観測レーダによる推定波浪スペクトルは、波浪のピークスペクトルや長周期波浪成分など、超音波式波高計による観測結果を精度良く再現している。しかし、0.167 Hz 以上の波浪成分はレーダによる観測では得られていない。これはレーダ画像の時間間隔が 3 s であるために、レーダによって得られたスペクトルが連続画像

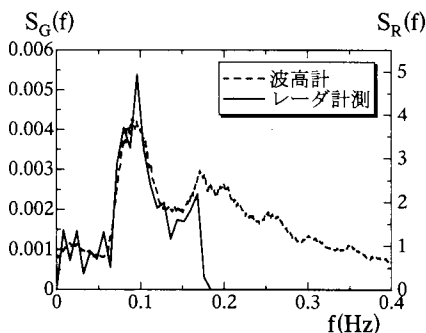


図-2 観測された周波数スペクトルの比較（小林ら，2001）

の時間間隔に対する Nyquist 周波数 0.167 Hz 以下（周期約 6 s 以上）のものに限られているからである。しかしこの図から、この Nyquist 周波数より高周波数の領域にも大きな波浪成分が存在することがわかる。また観測点や海象条件によってはピーク周波数が Nyquist 周波数程度あるいはそれ以上となることが十分考えられる。

X バンドレーダではレーダ画像を時間軸方向に内挿や平滑化が行えない。このため海洋波浪の主要成分である周期約 6 s 以下の波浪成分がこのシステムでは観測できないばかりか、この成分がエイリアシングの原因となり、波浪方向スペクトルや海洋表層流速の推定の大きな誤差要因となる。

(2) 機器の改良点

上記のように X バンド海洋観測レーダシステムではレーダアンテナ回転数に従う Nyquist 周波数以上の波浪成分は観測できない。このように波浪成分の大きな部分が観測不能であるため、海洋表層流速や波浪方向スペクトルの推定精度が低下しているものと考えられる。そこでレーダアンテナの回転数を向上させることによりこの Nyquist 周波数を大きくし、観測波浪周波数帯を高周波数側に拡大することを試みる。

機器の改良はレーダ製造メーカーによりアンテナ駆動部に施され、アンテナ回転速度をこれまでの 20 rpm から 40 rpm へと 2 倍に向上させた。

(3) 改良による効果

レーダアンテナ回転速度向上による、観測結果への効果を検討する。しかしこのアンテナ回転速度向上の効果を実地データを用いて直接検討することは困難である。そこで擬似的な連続シークラッター画像を生成し、このアンテナ回転数向上による効果を特にエイリアシングの面から検討する。

波向 0° 、周期 4.8 s（周波数 0.21 Hz）の波浪成分をアンテナ回転速度を 20 rpm および 40 rpm のレーダで取得したとして疑似連続シークラッター画像を作成し、それを解析した結果得られた波浪方向スペクトルを図-3 に示す。ここでアンテナ回転数 20 rpm、40 rpm 時のレーダ画像の Nyquist 周波数はそれぞれ 0.167 Hz（周期 6 s）および 0.333 Hz（周期 3 s）である。アンテナ回転速度 40 rpm（図-3(a)）では対象の波浪成分が正確に再現されている。これに対して回転速度 20 rpm（図-3(b)）ではエイリアシングにより誤った波浪成分が側方低周波域に現れていることがわかる。このように Nyquist 周波数以上の周波数の対象波浪成分は再現されないばかりでなく、エイリアシングにより誤った成分として現れ、海洋表層流速や波浪方向スペクトルの推定での誤差要因となることがわかった。また、アンテナ回転速度を 40 rpm と高速化したことにより、観測可能な海洋波浪成分が高

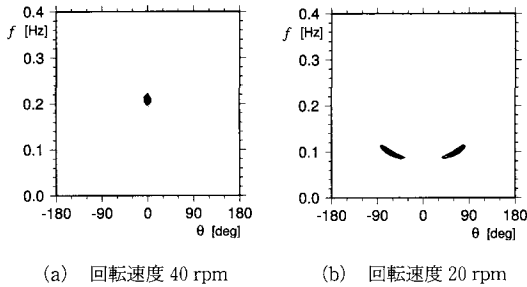


図-3 異なるアンテナ回転速度による方向スペクトル推定結果

周波数側に 0.333 Hz (周期 3 s) まで拡張することができた。

4. 解析手法の改良

(1) 現状の問題点

つぎに得られた連続シークラッター画像から海洋表層流速の推定手法についても検討する。既に示した通り、X バンド海洋観測レーダでは、連続シークラッター画像の三次元スペクトルに式 (1) の分散関係式を適用して推定する。しかしこの分散関係式は非線形であり、図-1 のとおり、低周波数 (つまり低波数) の領域で関数の勾配が大きくなっている。さらにシークラッター画像には通常、低周波数成分のノイズが特に多く含まれる傾向が見られる。この二つの理由から、連続シークラッター画像の三次元スペクトルに分散関係式を適用して海洋表層流速を推定する際に、従来の線形最小自乗法では特に低周波数のスペクトル成分やノイズ成分の影響を大きく受けてしまう。より高精度の海洋表層流速推定には波浪成分の低周波数成分から高周波数成分までの広い周波数成分のスペクトルを有効に活用する必要がある。

(2) 非線形最小自乗法の導入

先に述べた、海洋表層流速推定の問題点、すなわち流速推定時の低周波数成分への過大な重みは非線形方程式 (分散関係式) に線形最小自乗法を適用している点に起因していると考えられる。そこでこの線形最小自乗法に代り、全周波数成分の波浪成分を有効に活用できる様、非線形最小自乗法を導入した。

従来の線形最小自乗法ではスペクトル成分の角周波数 ω のみに誤差が含まれているとしている。これに対して非線形最小自乗法では、それぞれのスペクトル成分から分散関係式がスペクトル空間で形成する曲面 (図-1) までの距離を誤差と考え、これが最小になるようにした。

連続シークラッター画像を三次元フーリエ変換して得られるスペクトルのうち、任意の j スペクトル成分について、分散関係式が形成する曲面との距離 l_j を求める。この成分の波数ベクトルと角周波数を $\mathbf{k}_{j0} = (k_{xj0}, k_{yj0})$, ω_{j0}

とする。またこの点から式 (1) が形成する曲面 (図-1) への垂線の足の座標を $(\mathbf{k}_{j1}, \omega_{j1}) = (k_{xj1}, k_{yj1}, \omega_{j1})$ とする。ここで

$$\begin{aligned} y_j &= \begin{pmatrix} k_{xi0} \\ k_{yj0} \\ \omega_{j0} \end{pmatrix} \\ f_j &= \begin{pmatrix} k_{xj1} \\ k_{yj1} \\ \omega_{j1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{xj1} \\ k_{yj1} \\ \sqrt{gk_{j0} \tanh k_{j0} h + \mathbf{k}_{j0} \cdot \mathbf{U}} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

とすれば、

$$S_j = \sum_i W_{ji} (y_{ji} - f_{ji})^2 \rightarrow \text{最小} \quad \dots\dots\dots (2)$$

を満たす k_{xj1} , k_{yj1} を用いて、スペクトル成分と曲面との距離 l_j は

$$l_j^2 = \sum_i (y_{ji} - f_{ji})^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

より求められる。ここで W_{ji} は j スペクトル成分の i 成分に対する重みである。また $k_{j0} = |\mathbf{k}_{j0}|$ である。

次に海面表層流速 $\mathbf{U}$ を、複数のスペクトル成分と分散関係式の曲面との距離の自乗和を最小にする様に求める。すなわち

$$\begin{aligned} T &= \sum_j W'_j l_j^2 \\ &= \sum_j W'_j \sum_i (y_{ji} - f_{ji})^2 \rightarrow \text{最小} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

を満たす流速 $\mathbf{U} = (U, V)$ を求める。ここで W'_j は j スペクトル成分に対する重み、また m は解析に用いた重み W'_j の大きいスペクトル成分の数である。

この非線形最小自乗法には修正 Marquardt 法を用いた。ここで式 (4) は非線形であるため、流速 $\mathbf{U}$ の最適値は繰り返し計算により求める。繰り返し計算各回での流速 $\mathbf{U}$ の修正値 $\Delta \mathbf{U}$ が微小であると仮定すると、

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial k_{xj1}}{\partial U} & \frac{\partial k_{xj1}}{\partial V} \\ \frac{\partial k_{yj1}}{\partial U} & \frac{\partial k_{yj1}}{\partial V} \\ \frac{\partial \omega_{j1}}{\partial U} & \frac{\partial \omega_{j1}}{\partial V} \end{pmatrix} = \gamma_j \begin{pmatrix} k_{xj1} - k_{xj0} \\ k_{yj1} - k_{yj0} \\ \omega_{j1} - \omega_{j0} \end{pmatrix} (k_{xj1} \ k_{yj1}) \dots (5)$$

の関係が導かれる。ここで

$$\gamma_1 = 1 / \{ (\omega_{j1} - \omega_{j0}) - (\beta_j k_{j1} + U)(k_{xj1} - k_{xj0}) - (\beta_j k_{yj1} + V)(k_{yj1} - k_{yj0}) \}$$

$$\beta_j = \frac{g}{2k_{j1}} \frac{\tanh k_{j1} h + \frac{k_{j1} h}{\cosh^2 k_{j1} h}}{\sqrt{gk_{j1} \tanh k_{j1} h}}$$

である。本研究の修正 Marquardt 法は式 (5) を用いて海洋表層流速 $\mathbf{U}$ を逐次修正している。

表一 海洋表層流速の解析・再現結果

Case		対象	解析結果	
		疑似シークラッター画像	線形 最小自乗法	非線形 最小自乗法
1	u	0.00 m/s	-0.11 m/s	-0.02 m/s
	v	0.00 m/s	-0.01 m/s	0.00 m/s
2	u	1.00 m/s	0.88 m/s	0.95 m/s
	v	0.00 m/s	-0.03 m/s	0.00 m/s

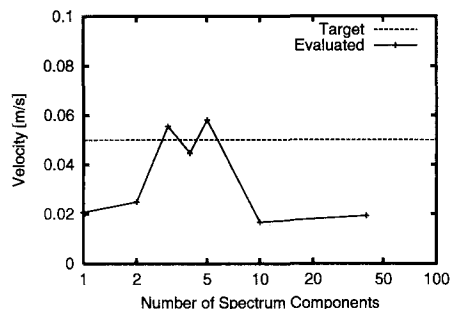
この非線形最小自乗法では式(2)、式(4)ともに非線形であるため、実際には、式(2)による分散関係式曲面上の点の波数ベクトル k_{21} の算出と、式(4)による海洋表層流速 U の修正、を交互に行ない、流速 U を収束させて、その推定値を求めている。

(3) 非線形最小自乗法による推定結果

先に述べた、非線形最小自乗法による海洋表層流速推定法による精度検証を行なう。ここでは擬似的に作成した連続シークラッター画像の解析に、従来の線形最小自乗法と上記の非線形最小自乗法を適用して、その解析結果の比較からこの手法の有効性について検討した。

任意の波浪成分と海洋表層流速成分を重ね合わせて生成した連続シークラッター画像を対象とした解析結果の一例として、波向 0° 、周期 6.2 s の波浪成分に海洋表層流速 $U=(0.0, 0.0)$ m/s あるいは $(1.0, 0.0)$ m/s を重ね合わせて生成した連続シークラッター画像の解析結果を表一に示す。この表のように、従来の線形最小自乗法でも再現対象となる海洋表層流速を推定しているものの、0.1 m/s 程度の推定誤差を含んでいる。対象とした疑似シークラッター画像が単一波浪成分のみを含む単純な条件であるにもかかわらずこのような誤差が生じたのは、連続シークラッター画像の時間・空間データ間隔がそれぞれ 1.5 s、7.5 m と波浪にとってやや粗いために、離散フーリエ変換を施した際に単一波浪成分が複数の離散スペクトル成分に分解され、これらを対象に海洋表層流速を解析・推定したためである。この離散化による誤差の傾向は特に単一波浪を対象とした場合に顕著で、無数の波浪成分を含む実波浪場でのシークラッター画像ではその誤差は縮小されている様である。これに対して非線形最小自乗法による解析結果では、表一に示すように海洋表層流速をほぼ満足な精度で再現している。

しかしながらこの非線形最小自乗法では良好な推定結果が得られない場合も見られた。その一例として、周期 6.2 s、波向 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の 3 つの波浪成分と海洋表層流速 $U=(0.0, 0.05)$ m/s から生成した疑似シークラッター画像を、非線形最小自乗法による手法を用いて解析した結果を図一に示す。図中、横軸は式(4)中の解析対象スペクトル成分数 m 、縦軸は海洋表層流速の大きさ $|U|$ である。疑似シークラッター画像中の流速は $|U|=$



図一 非線形最小自乗法による解析結果に対する、解析対象スペクトル成分数 m の影響。疑似波浪場の海洋表層流速 $|U|=0.05$ m/s

0.05 m/s であり、図中、破線で表されている。また解析結果の流速は図中では実線で表されている。この図が示すように、解析対象スペクトル数 m を増加するにしたがって推定精度も向上するが、この数がある程度大きくなると推定値には再び大きな誤差が含まれるようになる。これは解析対象とするスペクトル数 m を大きくするとスペクトル強度が小さく、波浪成分情報に比べてノイズを多く含んだスペクトル成分も解析対象となるため、このような推定精度の急激な低下が生じると考えられる。この点についてはさらに検討する必要がある。

以上のように、非線形最小自乗法を導入した手法は従来の線形最小自乗法による手法に比べて海洋表層流速の推定精度の向上が見られた。ただし推定条件によっては明らかな誤差を含む値を算出する場合も見られた。

5. 現地観測への適用

本研究で改良した X バンド海洋観測レーダシステムを現地観測に適用し、システムの有用性を検証した。

2003 年 11 月から 2004 年 2 月まで京都大学防災研究所大潟波浪観測所にこのレーダを設置し、レーダアンテナを中心とした半径 5 km の範囲を対象に冬季日本海の沿岸波浪を毎正時に観測した。その結果の一例として、2003 年 12 月 15 日 17 時に観測された、汀線から沖 1000 m の地点での波浪方向スペクトルを図一に示す。この図では、横軸は波向（進行方向） θ を表しており、 $\theta=0^\circ$ および $\pm 180^\circ$ は沿岸方向を、 $\theta=-90^\circ$ は汀線に直角に入射する波向を表している。また縦軸は周波数 f である。図では汀線にほぼ直角に入射する波浪成分が観測されている。この観測では他の機器による同時観測を行なっていなかったために、この観測結果の妥当性を定量的に検討することはできなかった。しかしこの図ではアンテナ回転速度 20 rpm の Nyquist 周波数、0.167 Hz より高周波数の波浪成分も再現されており、妥当と思われる結果が得られていると判断した。

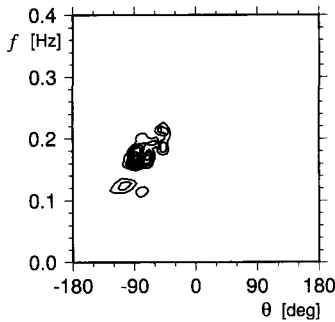


図-5 Xバンドレーダで観測された、波浪方向スペクトル
(2003年12月15日17時、大潟海岸)

一方、非線形最小自乗法による海洋表層流速の推定では、図-5のケースでは適切と思われる流速値を推定しているものの、観測対象領域全域で満足な値を得るまでにはいたらなかった。これは対象領域内の各観測小領域がレーダアンテナからの距離が異なるために、反射散乱強度とノイズとの比(S/N比)が小領域ごとに異なり、このために図-4に示されるような適切な解析スペクトル成分数 m の値が異なってしまうからである。

また非線形最小自乗法を用いた解析手法の場合、適切なスペクトル成分数 m による解析では高い解析精度が期待できるのに対し、特に現地観測データのように多くのノイズを含んだデータを解析する場合など、適切なスペクトル成分数 m を選定していないと、推定流速値にきわめて大きな誤差が含まれたり、推定自体が発散する場合がしばしば見られた。これは従来の線形最小自乗法がどのような場合にも妥当な流速値を推定するのと対照的な性質である。非線形最小自乗法の高推定精度を活用するためには、大きな誤差や発散を抑制する新たな拘束条件を検討する必要がある。

6. おわりに

本研究では現在のXバンド海洋観測レーダが有する海洋表層流速および波浪方向スペクトルの観測・推定精度に関する問題点を検討し、観測・推定精度向上のためにレーダシステムをハードウェアおよびソフトウェアの両面から改良を行なった。

本研究ではまず、レーダアンテナの回転数を向上させることにより連続シークラッター画像の三次元スペクトル

ルのNyquist周波数を大きくし、観測波浪周波数帯を高周波側に拡大した。これにより観測できる海洋波浪成分も拡大し、海洋表層流速や波浪方向スペクトルの推定精度を向上させることができた。

また連続シークラッター画像の三次元スペクトルから海洋表層流速を推定する際に、従来の線形最小自乗法に代り、新たに非線形最小自乗法を導入して推定精度向上を試みた。この非線形最小自乗法を用いた推定手法は適切な条件下では従来の線形最小自乗法を用いた手法に比べて高精度の推定が可能であった。しかし多くのノイズを含む場合などの条件下では大きな誤差を生じたり、推定が発散し、適切な海洋表層流速が推定できない場合が見られた。これは今後改良が求められる点である。

上記の二つの改良を施したXバンド海洋観測レーダを用いて、冬季日本海の沿岸波浪の現地波浪観測を実施した。そして特にアンテナ回転速度向上による観測データの改善が確認された。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)(2)14550511および基盤研究(B)(2)16360243に関する成果であることを付記し謝意を表わす。

参考文献

- 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・山崎将史・湯本大輔・渡辺章人・安田孝志(2002): Xバンドレーダによる冬期日本海沿岸海洋観測, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1516-1520.
- 高野誠紀・坂井秀雄・中宮正人・坂井隆行・李在炯(2004): 新潟西海岸の冬季風浪時における面的流況観測結果, 海岸工学論文集, 第51巻.
- 武若聡・後藤勇・西村仁嗣(2003): Xバンドレーダを用いた前浜地形の観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 546-550.
- 土木学会研究現況レビュー小委員会編(2001): 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会, 212 p.
- Borge, J. C. N., R. S. Gonzalez, K. Hessner, K. Reichert and C. G. Soares (2000): Estimation of sea state directional spectra by using marine imaging of sea surface, Proc. ETCE/OMAE 2000 Joint Conf. Energy for the New Millennium, ASME.
- Reichert, K., K. Hessner, J. C. Nieto-Borge and J. Dittme(1999): WaMoS II: A Radar Based Wave and Current Monitoring System, Proc. ISOPE, Vol. III, pp. 139-143.
- 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.