

一次散乱を考慮した海洋短波レーダによる波浪の 方向スペクトルの推定法

児島正一郎*・橋本典明**・佐藤裕司***

1. はじめに

海洋短波レーダによる波浪の方向スペクトルの推定法はこれまでにいくつか提案されているが(例えば, 橋本ら, 1998), 実際の観測データに適用し, 成功した例は英国で実施されたパルスレーダ方式の海洋短波レーダによる観測のみである(例えば, Wyatt ら (1997) や橋本ら (2000)). 一方, 日本においてはパルスレーダ方式と比較して設置面積が小さく, 高い空間分解能を有するものの, 受信信号のダイナミックレンジを広く取ることができない(SN 比が悪い) FMICW (Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave) 方式の海洋短波レーダの使用のみが認可されている. このため, FMICW 方式の海洋短波レーダによる広域波浪観測を実用レベルで使用するためには, SN 比を向上させるためのレーダシステムの検討(送信波の出力の増幅など)と, 大気や人間活動等から発生するノイズが推定される方向スペクトルにどのような影響を及ぼし, 安定して精度の高い方向スペクトルの推定するためにはどのように方向スペクトルを推定すればよいのかを検討する必要がある. 前者のレーダシステムの検討に関しては, 電波法等の法律による規制があるため, 容易に解決することが困難である. これに対して, 後者のノイズが推定される方向スペクトルに及ぼす影響については児島ら (2001) によって理論的な検討がなされ, ノイズが推定される方向スペクトルに及ぼす影響を定量的に明らかにしている.

本研究では, FMICW 方式の海洋短波レーダで広域波浪観測を行った時に得られるドップラースペクトルから方向スペクトルを推定する際の問題点を明らかにし, その問題点を解決するための新たな方向スペクトル推定法の開発を行った. さらに, 波高計との同時観測を行うことにより, その推定精度と問題点を明らかにした.

2. ドップラースペクトルと方向スペクトルの関係

海洋短波レーダより得られるドップラースペクトル $\sigma(\omega)$ は, 海面における電波の後方散乱断面積の一次散乱成分 $\sigma^{(1)}(\omega)$ と二次散乱成分 $\sigma^{(2)}(\omega)$ の和で近似することができる. Barrick (1972) は海面をランダムな凹凸のある表面として扱い, そこで起きる電磁波の後方散乱がブラッグ散乱機構に準じていると仮定することにより, レーダ方程式を Rice の摂動法に基づき摂動展開した. この摂動展開により, 後方散乱断面積の一次散乱成分 $\sigma^{(1)}(\omega)$ と二次散乱成分 $\sigma^{(2)}(\omega)$ をそれぞれ以下のように表される.

$$\sigma^{(1)}(\omega) = 2^6 \pi |k|_0^6 \sum_{m=\pm 1} S(-2mk_0) \delta(\omega - m\omega_B) \dots\dots (1)$$

$$\sigma^{(2)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1, m_2=\pm 1} \iint_{-\infty}^{\infty} |\Gamma|^2 S(m_1 k_1) S(m_2 k_2) \times \delta(\omega - m_1 \sqrt{gk_1} - m_2 \sqrt{gk_2}) dp dq \dots\dots (2)$$

ここで, k_0 はレーダで使用した電磁波の波数ベクトル, k_0 はレーダで使用した電磁波の波数 ($k_0 = |k_0|$), ω はドップラ一周波数, ω_B はブラッグ周波数をそれぞれ表している. 電磁波とブラッグ共鳴する自由波が深海波である場合には, ブラッグ周波数 ω_B は分散関係式より

$$\omega_B = \sqrt{2gk_0} \dots\dots\dots (3)$$

と表される. m, m' はドップラースhiftの符号 (± 1), $S(mk)$ は波浪の波数スペクトル, k, k' はレーダ波の散乱に関わる 2 つの自由波の波数ベクトル, k, k' はレーダ波の散乱に関わる 2 つの自由波の波数, 積分変数 k_x, k_y はそれぞれレーダ波の進行方向 (レンジ方向) と進行方向に直交な方向 (アジマス方向) 座標をそれぞれ表している. 散乱に関与する波の波数ベクトル k, k' は

$$k = (k_x - k_0, k), \quad k' = -(k_x - k_0 - k_y) \dots\dots\dots (4)$$

$$k + k' = -2k_0 \dots\dots\dots (5)$$

の関係がある. また, Γ は結合係数と呼ばれ, 2 つの波数成分 k, k' の波浪成分が, 2 次の散乱断面積に寄与する程度を表す. 結合係数 Γ は, 一般に, 電磁気学的な 2 次散乱による部分 Γ_E と流体力学的な 2 次散乱による部分 Γ_H の和 ($\Gamma = \Gamma_E + \Gamma_H$) で表され, それぞれ次式で与えられる.

* 正会員 博(工) 科学技術振興事業団
** 正会員 工 博 (独) 港湾空港技術研究所海洋水工部 海洋水理研究室長
*** 国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部 沿岸域システム研究室

$$\Gamma_H = -\frac{i}{2} \left\{ k + k' - \frac{(kk' - k \cdot k')}{mm' \sqrt{kk'}} \frac{\omega^2 + \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2} \right\} \dots (6)$$

$$\Gamma_E = -\frac{1}{2} \left\{ \frac{(k \cdot k_0)(k' \cdot k_0)}{\sqrt{k \cdot k' - k_0 \Delta}} \frac{k_0^2 - 2k \cdot k'}{k_0^2 - 2k' \cdot k'} \right\} \dots (7)$$

ここで、 Δ は海面の複素インピーダンスで、絶対値の小さな複素数である。ドップラースペクトル $\sigma(\omega)$ 上では、1次散乱成分 $\sigma^{(1)}(\omega)$ と2次散乱成分波 $\sigma^{(2)}(\omega)$ はそれぞれ異なる位置に現れるため、2次散乱成分の強度が弱くても相互に分離可能である。式(5)から明らかなように、2次散乱成分には波数ベクトル k, k' で表される2つの成分波が関与している。対象とするドップラー周波数 ω_B に関与する k, k' の組合せは、式(2)中の δ 関数と式(5)の制限内で無数の組合せがある。

3. 一次散乱を考慮した方向スペクトルの推定法

ドップラースペクトルの一次・二次散乱成分と波浪の方向スペクトルの関係を表す式(1)、(2)から、波浪の方向スペクトルを逆推定する非適切逆問題は、何らかの方法や工夫によって最小値検索問題に帰着することにより解くことができる。通常、最小値検索問題は最小2乗法を用いて解くことができる。しかしながら、通常の最小2乗法は推定する物理量(方向スペクトル)の事前確率分布(推定される物理量が満たすべき条件(先験条件))を考慮していないため、定常的に精度の高い解を得ることが困難である。特に、海洋短波レーダの受信信号は大気や人間活動等から発生するノイズの影響を強く受けていることが多く、推定する方向スペクトルの事前確率分布を考慮しなければ、推定値は真値と全く異なったものになる可能性がある。このような問題を解決するために、橋本ら(1999)は推定する方向スペクトルの事前確率分布を考慮したベイズ型方向スペクトル推定法を提案している。この方向スペクトル推定法では、推定される方向スペクトルが滑らかに変化しなければならないという先験条件を事前確率分布に反映させ、式(2)を用いて方向スペクトルを算定する。ノイズレベルが低い場合には、この方向スペクトル推定法によって精度良く方向スペクトルを推定することができる。しかしながら、ノイズレベルが高くなると、推定される方向スペクトルの精度が著しく低下する。児島ら(2001)はノイズの影響を受けたレーダの受信信号を数値シミュレーションすることにより、推定する方向スペクトルに対するノイズの影響評価を行っている。この評価によれば、ノイズの影響は方向スペクトルの形状に最も強い影響を及ぼし、ノイズレベルが高くなると波向を推定することが困難になる。本研究ではこの問題を解決するために、式(2)のドップラースペクトルの二次散乱成分と方向スペク

ルの関係式に加えて、式(1)で表されるドップラースペクトルと方向スペクトルの関係式も考慮することにより、推定される方向スペクトルの精度を向上させる。

最初に、ドップラースペクトルより推定する方向スペクトル $S(f, \theta)$ を橋本ら(1999)が定式化した方法に習い、指数部に離散的な一定値関数を有する指数関数を用いて、次式で表現した。

$$S(f, \theta) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \exp(x_{i,j}) \delta_{i,j}(f, \theta) \dots (8)$$

$$x_{i,j} = \ln S(f_i, \theta_j) \dots (9)$$

ここで、 f は周波数、 θ は方向角、 I は周波数分割数、 J は方向分割数、 $\delta_{i,j}(f, \theta)$ はデルタ関数をそれぞれ表している。

次に、ドップラースペクトルから方向スペクトルを逆推定する非適切逆問題を以下に示す E の最小値検索問題に帰着する。

$$E = E_0 + u^2 E_{ss} \dots (10)$$

ここで、 E_0 は客観的な誤差エネルギー、 E_s は主観的な誤差エネルギー、 u^2 は超パラメータをそれぞれ表している。客観的な誤差エネルギー E_0 は観測値と推定値の一致度を表し、この値が小さいほど観測値と推定値が良く一致していることを表す。これに対して、主観的な誤差エネルギー E_s は推定された方向スペクトルが先験条件をどの程度満たしているのかを表す。本研究では先験条件として推定される方向スペクトルが滑らかに変化しなければならないと仮定している。このため、推定する方向スペクトルの微分値の全エネルギーが小さいほど先験条件を満たした方向スペクトルを算定していることになる。超パラメータ u^2 は主観的な誤差エネルギー E_s の重みを与える定数で、その値が小さくなれば推定される方向スペクトルは観測されたドップラースペクトルに一致するように推定され、その値が0のときは事前確率分布(先験条件)を考慮しない最小2乗法による方向スペクトルの推定と同じになる。これに対して、超パラメータ u^2 の値が大きくなると、推定される方向スペクトルは主観(先験条件)にかなったものになり、観測されたドップラースペクトルの値が推定に反映されなくなる。このように、本研究では客観的な誤差エネルギー E_0 と主観的な誤差エネルギー E_s を超パラメータ u^2 で規定するバランスで結合した全エネルギーを最小にするというエネルギー最小原理に基づいた推定を行う。客観的な誤差エネルギー E_0 は以下のように定式化できる。

$$E_0 = \sum_{k=1}^K \{ \bar{\sigma}_k^{(2)} - \bar{D}_k^{(2)} \}^2 + \{ \bar{\sigma}_{\min}^{(1)} - \bar{D}_{\min}^{(1)} \}^2 \dots (11)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_k^{(2)}$ はドップラースペクトルの一次散乱成分で規格化したドップラースペクトルの二次散乱成分、 $\bar{\sigma}_{\min}^{(1)}$ はドップラー周波数の正負に存在するドップラースペク

トルの一次散乱成分の小さい方を大きい方で規格化したもの、 $\tilde{D}_k^{(2)}$ は推定された方向スペクトルから算定された規格化されたドップラースペクトルの二次散乱成分、 $\tilde{D}_k^{(1)}$ は推定された方向スペクトルから算定された規格化されたドップラースペクトルの一次散乱成分の小さい方を大きい方で規格化したものをそれぞれ表している。

一方、主観的な誤差エネルギー E_s は 8 方向の微分オペレータと推定される方向スペクトルを規定する $x_{i,j}$ によって以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{8} \sum_i \sum_j (x_{i-1,j-1} + x_{i,j-1} + x_{i+1,j-1} + x_{i-1,j} \\ & + x_{i+1,j} + x_{i-1,j+1} + x_{i,j+1} + x_{i+1,j+1} - 8x_{i,j})^2 \\ & + \frac{1}{5} \sum_i (x_{i-1,1} + x_{i+1,1} + x_{i-1,2} + x_{i,2} + x_{i+1,2} - 5x_{i,1})^2 \\ & + \frac{1}{5} \sum_j (x_{i-1,j-1} + x_{i+1,j-1} + x_{i-1,j} + x_{i,j} + x_{i+1,j} \\ & - 5x_{i,j})^2 \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

客観的な誤差エネルギー E_o と主観的な誤差エネルギー E_s のバランスを決定する超パラメータ u は、物理的にその値を決定する方法は現在のところ存在しない。そこで、本研究ではこの超パラメータ u を赤池 (1980) によって提案された ABIC (赤池のバイズ型情報量基準) を用いて決定した。ABIC は次式で表され、その最小化によって推定される方向スペクトルの解の確からしさ (客観的な誤差エネルギー $E_o \rightarrow$ 小) と滑らかさ (主観的な誤差エネルギー $E_s \rightarrow$ 小) の両方の観点 (全エネルギー $E \rightarrow$ 最小) から望ましい超パラメータ u を自動的に決定することができる。

$$ABIC = -2 \ln \int L(X|\lambda^2) p(X|u^2, \lambda^2) dX \dots\dots (13)$$

ここで、 $L(X|\lambda^2)$ は推定する方向スペクトルを規定する X の事後確率分布の尤度関数を表し、 $p(X|u^2, \lambda^2)$ は X の事前確率分布の尤度関数を表し、 λ^2 は X の分散を表している。 $L(X|\lambda^2)$ と $p(X|u^2, \lambda^2)$ の尤度関数はそれぞれ次

式によって表すことができる。

$$L(X|\lambda^2) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\lambda)^K} \exp\left[-\frac{V}{2\lambda^2}\right] \dots\dots\dots (14)$$

$$p(X|u^2, \lambda^2) = \left(\frac{u}{\sqrt{2\pi}\lambda}\right)^M \exp\left\{-\frac{u^2 N}{2\lambda^2}\right\} \dots\dots\dots (15)$$

$$X = (x_{1,1}, \dots, x_{i,j}) \dots\dots\dots (16)$$

式 (13) で表される ABIC と式 (10) で表されるエネルギー E を最小にする X を推算することで、情報論的に最も信頼性の高い方向スペクトル $S(f, \theta)$ を推定したことになる。しかしながら、ABIC は推定される方向スペクトル $S(f, \theta)$ の物理過程を考慮しているわけではないので、その最小化によって推算される方向スペクトル $S(f, \theta)$ が物理的に妥当なものであるかどうかは検討する必要がある。

4. HF レーダによる面的波浪観測

波高計との同時観測を行うことにより、海洋短波レーダ (HF レーダ) による波浪観測の精度とその問題点を明らかにする。この同時観測は鹿児島周辺海域に対して 2000 年 11 月 2 日～2000 年 11 月 8 日の期間実施した。図-1 に HF レーダの設置地点 (A 局と B 局)、ビームの発射方向 (12 方向)、観測地点 (総計 101 地点の観測地点) 及び海底設置型の波高計の設置地点 (観測地点 18) を示す。今回の同時観測に用いた HF レーダの諸元は表-1 の通りで、1 測線の観測時間は波浪観測の精度を向上させるために 10 分間とした。観測地点 18 に設置した海底設置型の波高計は水深 30 m の海底に設置した。

ドップラースペクトルから方向スペクトルを精度良く推算するためには、ドップラースペクトルの一次散乱成分と二次散乱成分を適切に分離する必要がある。しかしながら、観測から得られるドップラースペクトルは激しい変動性を有しているため、一次散乱と二次散乱を適切に分離することが困難である。そこで、本研究ではドップラースペクトルの信頼性を向上させ、一次散乱と二次散乱を適切に分離するために Wavelet による多重解像

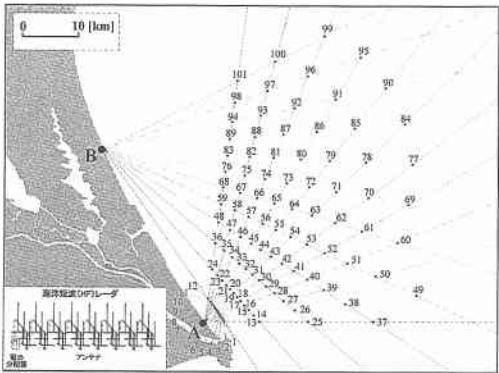


図-1 観測対象海域

表-1 HF レーダの諸元

項目	HF レーダ諸元
周波数	24.515 MHz
周波数帯引幅	100 kHz
レーダ形式	送受切り替え FMCW
送信出力	100 W (ピーク幅)
偏波	垂直偏波
ビーム幅	15 度 (水平方向)
ビームスキャン	±45 度/7.5 度ステップ
寸法	約 49 m (長さ) × 14 m (高さ)
距離分解能	1.5 km

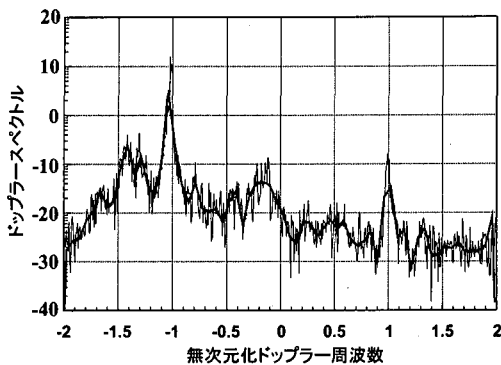


図-2 ドップラースペクトルの一例

度解析によるスムージング処理を行った。Wavelet による多重解像度解析によるスムージング処理における展開レベルは検討の結果、展開レベル3（ただし、サンプル数が512）が観測されたドップラースペクトルの一次散乱成分と二次散乱成分を最も適切に分離することができる展開レベルであることがわかった。図-2にHFレーダから得られたドップラースペクトルとWaveletによる多重解像度解析によるスムージング処理を行ったドップラースペクトルの一例を示す。スムージング処理によって、容易にドップラースペクトルの一次散乱成分と二次散乱成分を分離することができる。さらに、スムージング処理によってドップラースペクトルの自由度を高め（展開レベル3の場合、ドップラースペクトルの自由度は8となる）、その信頼性を向上させている。このようにしてスムージング処理されたドップラースペクトルを用いて方向スペクトルの推算を行う。

5. 波高計との比較・検討

5.1 方向スペクトルの比較

図-3にドップラースペクトルの二次散乱成分のみを用いたベイズ型方向スペクトル法（従来の方向スペクトル推定法）を使って推定した方向スペクトル（図-3(a)）と本研究で提案したドップラースペクトルの一次散乱成

分も考慮した方向スペクトル推定法（新しい方向スペクトル推定法）を使って推定した方向スペクトル（図-3(b)）及び波高計より算定した方向スペクトル（図-3(c)）の比較を示す。両推定法とも、有義波高・有義周期に関しては実測値（波高計によって計測された値）と良く一致している。一方、図-3(a)の方向スペクトルの形状は、図-3(c)の方向スペクトルと大きく異なっている。これは方向スペクトルを推定する際に使用したドップラースペクトルの二次散乱成分がノイズの影響を強く受け、波浪の方向を特定するのに必要な情報が劣化してしまっているためである。これに対し、図-3(b)の方向スペクトルの形状は図-3(c)の方向スペクトルと良く一致している。これは方向スペクトルを推定する際に使用したドップラースペクトルの一次散乱成分の比が波浪の方向を適切に決定しているからである。通常、ドップラースペクトルの一次散乱成分は二次散乱成分と比較してエネルギーが大きく、ノイズの影響を受けにくい。このため、ドップラースペクトルの一次散乱成分を考慮することにより、安定して方向スペクトルを推算することができる。以上より、ノイズの影響を強く受けた受信信号から方向スペクトルの形状を精度良く推算するためには、一次散乱成分を考慮しなければならないことがわかる。

5.2 有義波高の比較

図-4(A)にHFレーダと波高計から得られる有義波高の比較を示す。有義波高は方向スペクトルの全エネルギーから算定した。HFレーダから推算される有義波高は、波高計から得られる有義波高と比較して激しく変動しているが、その変動の平均的傾向は一致している。この有義波高の激しい変動は、HFレーダから推算される方向スペクトルの全エネルギーが、精度良く推算されていないことが原因として考えられる。方向スペクトルは、A局とB局のHFレーダから得られたドップラースペクトルを用いて推算した。A局のHFレーダは観測海域に対して真正面（北より時計回りに60度方向）あるのに対し、B局のHFレーダは観測海域に対して右37.5度方向（北より時計回りに137.5度方向）である。このため、

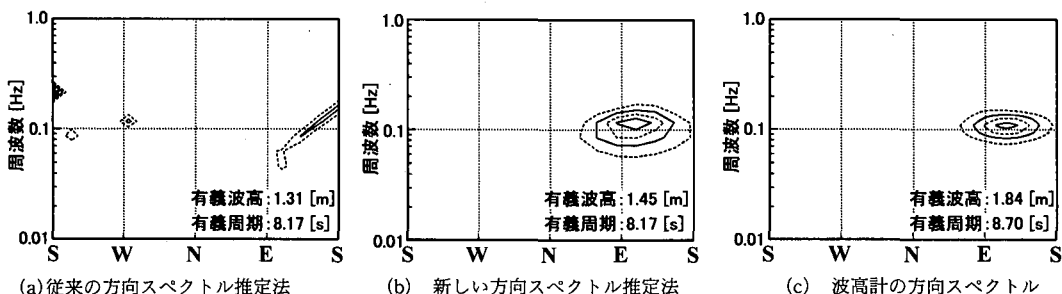


図-3 波浪の方向スペクトルの比較（2000年11月5日9時）

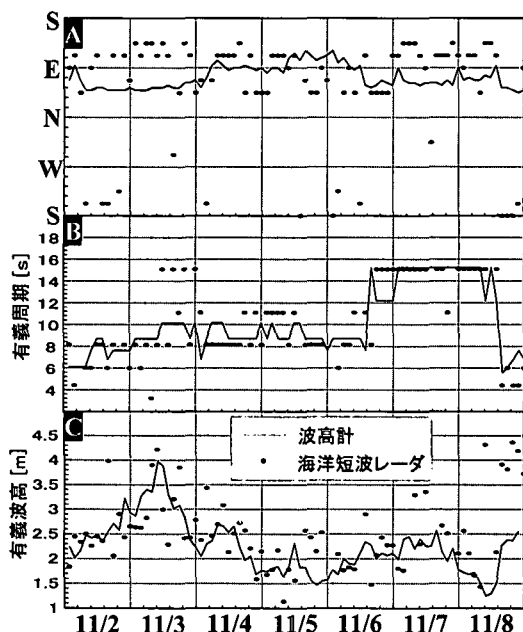


図-4 HFレーダと波高計の比較

B局のHFレーダから得られるドップラースペクトルは、A局のHFレーダより得られるドップラースペクトルよりもサイドロープの影響(SN比の低下)を強く受け、その精度は低下している。このB局のドップラースペクトルの精度低下が、推定する方向スペクトルの精度低下を引き起こしている。

5.3 有義周期の比較

図-4(B)にHFレーダと波高計から得られる有義周期の比較を示す。有義周期は周波数スペクトルのピーク周波数から算定した。HFレーダから推算される有義周期は、波高計から得られる有義周期の変動と良く一致している。これは周波数スペクトルがドップラースペクトルの一次散乱付近のエネルギーが大きく、ノイズの影響を受けにくい二次散乱成分の値で決まっているからである。

5.4 ピーク波向の比較

図-4(C)にHFレーダと波高計から得られるピーク波向の比較を示す。HFレーダから推算されるピーク波向は、波高計により得られるピーク波向と比較して、そのばらつきは大きく、方向分解能が低いことがわかる。これはB局の受信信号のSN比が低いために生じる方向スペクトルの推定精度の低下が原因である。

6. おわりに

大気や人間活動等から発生するノイズの影響を受けやすいFMICW方式のHFレーダを用いて、精度良く方向スペクトルを推定するためにはドップラースペクトルの一次散乱成分と二次散乱成分を用いて方向スペクトルを推定する必要がある。今後はレーダによって推定される波浪の諸量(方向スペクトル、有義波高、有義周期など)の精度を向上させるために、SN比を向上させるようなレーダシステムの検討及びレーダの受信信号から波浪に関する情報を抽出するための方法の更なる検討を行っていかなければならない。

謝辞：本研究は、茨城県と波崎町からHFレーダを設置するための土地の提供を受け、運輸施設整備事業団の「運輸分野における基礎的研究推進制度」よりHFレーダの提供を受けた。また、文部科学省海洋開発及地球科学技術調査研究促進費の補助を受けた。ここに記して謝辞を表します。

参 考 文 献

- 児島正一郎・橋本典明・徳田正幸 (2001): 海洋短波レーダによる波浪観測に関する基礎的研究—受信信号中のノイズの影響評価—, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1446-1450.
- 土木学会海岸工学委員会研究レビュー小委員会 (2001): 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会, 212 p.
- 橋本典明・徳田正幸 (1998): 海洋短波レーダによる方向スペクトルの推定, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1271-1275.
- 橋本典明・児島正一郎・L. R. Wyatt (2000): 海洋短波レーダにおける方向スペクトルの推定法に関する検討, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1331-1335.
- Akaike, H. (1980): Likelihood and Bayesian procedure, Bayesian Statistics (Bernardo, J. M., De Groot, M. H., Lindley, D. U. and Smith, A. F. M. eds.) University Press, Valencia, pp. 143-166.
- Barrick, D. E. (1972): Remote sensing of sea state by radar, Remote sensing of the Troposphere, V. E. Derr, Editor, U. S. Govt. Printing Office, Washington, D. C., 12.
- Hashimoto, N., S. Kojima, M. Tokuda (2000): Estimation of Directional Spectra from HF Radar Surface Backscatter, Coastal Engineering 2000, Vol. 2, pp. 1349-1362.
- Kojima, S., N. Hashimoto, Y. Sato (2001): The influence evaluation of the noise for the directional spectrum estimated from HF radar receiving signal, Wave 2001, in printing.
- Wyatt, L. R. (1990): A relaxation method for integral inversion applied to HF radar measurement of the ocean wave directional spectra, Int. J. Remote Sensing, Vol. 11, pp. 1481-1494.
- Waytt, L. R. (1997): The ocean wave directional spectrum, Vol. 10, No. 2, pp. 85-89.