

海洋短波レーダーにおける方向スペクトルの推定法に関する検討

橋 本 典 明*・児島正一郎**・Lucy R. Wyatt***

1. はじめに

海洋短波レーダーによる流れの観測は既に実用段階に入っており、これまでに多くの成果が報告されている。一方、海洋短波レーダーを利用して方向スペクトルを計測・推定する方法は、いまだ実用段階には至っておらず、急務の研究課題となっている。このような状況において、欧米ではこれまでに幾つかの方向スペクトル推定法が提案されてきたが、実際の観測データに適用し、成功した例は、Wyatt (1997) による EC MAST SCAWVEX project (Surface Current And Wave Variability Experiments) の他には殆ど報告例がない。我が国でも Hisaki (1996)、橋本・徳田 (1998) により方向スペクトル推定法が提案されているが、現地観測データへの適用性については未検討のままで、理論的な可能性を検討するに留まっている。

本研究は橋本・徳田が提案したベイズ法を方向スペクトルの推定例が報告されている上記の SCAWVEX データに適用し、その適用性を検討すると共に、問題点や注意点を明らかにし、海洋短波レーダーによる海象調査技術の向上に資することを目的にしている。

2. 方向スペクトル推定法に関する既往の研究

海洋短波レーダーにより得られるドップラースペクトル $\sigma(\omega)$ は、電波の海面による 1 次散乱成分 $\sigma^{(1)}(\omega)$ と 2 次散乱成分 $\sigma^{(2)}(\omega)$ の和 ($\sigma(\omega) \approx \sigma^{(1)}(\omega) + \sigma^{(2)}(\omega)$) で近似でき、それぞれ次式で表される。

$$\sigma^{(1)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m=\pm 1} S(-2mk_0, 0) \delta(\omega - m\omega_B) \dots\dots\dots (1)$$

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

ここに、 $\sigma^{(1)}(\omega)$ と $\sigma^{(2)}(\omega)$ はそれぞれ角周波数 ω における 1 次と 2 次の後方散乱断面積、 k_0 は電波の波数ベクトル、 $S(k) = S(k_x, k_y)$ は波浪の波数スペクトル、 $\omega_B (= \sqrt{2gk_0})$ はブラッグ角周波数である。積分変数 p と q はそれぞれレーダーのビーム軸方向およびそれと直交する座標で、散乱に関与する波の波数ベクトル k_1 , k_2 と、

$$k_1 = (p - k_0, q), \quad k_2 = (-p - k_0, -q) \dots\dots\dots (3)$$

で結ばれる変数である。すなわち、

$$k_1 + k_2 = -2k_0 \dots\dots\dots (4)$$

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_1 と k_2 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 ($\Gamma = \Gamma_E + \Gamma_H$) で表される (Barrick, 1972)。

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、その強度が弱くても分離可能であり、それぞれのスペクトル成分を用いて、気象・海象に関する情報が得られる。式 (2) から明らかなように、2 次散乱成分には波数ベクトル k_1 と k_2 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に関与する k_1 と k_2 の組合せは、式 (2) 中の関数と式 (4) の制限内で無数の組合せがある。すなわち、式 (2) には、種々の方向に伝播する無数の周波数成分波からの寄与が含まれており、原理的にはこの情報をもとに方向スペクトルを推定することが可能である。しかしながら、式 (2) に基づいて方向スペクトルを推定する場合、以下の問題がある。

- 1) 式 (2) の積分は、デルタ関数の制約から、波数平面を分散関係式によって変換した「周波数-方向」平面上の曲線に沿って行わなければならないため、式 (2) の積分の離散化は複雑である。
- 2) この問題は与えられる条件式の数よりも未知数の数が多い、いわゆる非適切逆問題である。すなわち、測定値に含まれる誤差が小さくとも、得られる解には大きな影響を与える可能性がある。

海洋短波レーダーで観測されるドップラースペクトルから波浪パラメータやスペクトルを推定する試みは

* 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所海洋環境部水理研究室長
** 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所海洋環境部水理研究室 (科学技術庁特別研究員)
*** Ph.D. Professor, Sheffield Center for Earth Observation Science, Applied Mathematics Department, University of Sheffield, UK

Barrick(1972, 1977)が最初である。Barrick は、式(2)に含まれる2つの波数スペクトルの内、波数の大きい波数スペクトルを1次散乱する波浪成分を用いて既知と仮定することにより積分の外に出し、式(2)を波数の短い波浪成分の波数スペクトルに関する線形化した積分方程式で近似し、波高と周期を算出する式を提案した。Wyatt (1990) や Howell・Walsh (1993) は、Barrick の線形化した積分方程式をもとに、波浪のスペクトルを推定する方法を提案した。

Hisaki (1996) は、式(2)を線形近似せず、非線形積分方程式のまま扱い、方向スペクトルを推定する方法を提案した。Hisaki は、前述の1), 2)の問題を解決するため、式(2)で与えられる基礎式に加えて、方向スペクトルが満たすことが望ましい先験条件を付加し、非線形最適化問題を逐次代入法によって解くことにより、方向スペクトルを推定する方法を提案した。Hisaki の方法は、橋本(1987)が提案したベイズ型モデルによる方向スペクトル推定法に近い考え方を導入しているが、先験条件に方向スペクトルが滑らかな連続関数である期待の他に、スペクトル値が周波数や方向角に対して既知の比で変化する条件とスペクトル値が負になることを避ける条件も先験条件に加えられており、先験条件の数が未知パラメータの数に対して過剰になっている。また、それぞれの先験条件に導入された重み係数の適切な設定が課題として残されたままであった。

橋本・徳田(1998)は、Hisakiの方法に含まれている幾つかの問題点を解消するため、橋本(1987)が先に提案したベイズ型モデルを用いた研究を応用し、海洋短波レーダーに適用可能な方向スペクトル推定法を開発した。この方法では、方向スペクトルが負値を取らない条件を満足させるため、方向スペクトルの関数形として周波数と方向角に関する離散的な一定値関数を有する指数関数を仮定した。また、指数部の離散的パラメータが滑らかな連続関数である条件を先験条件として付加しており、先験条件の数は未知パラメータの数と等しく与えられている。さらに、式(2)の基礎式を満たす程度と方向スペクトルが滑らかな連続関数であるという先験条件を満たす程度とのバランスを取るため、解の確からしさと滑らかさの両方の観点から望ましい重み係数が得られるように、赤池のベイズ型情報量基準 ABIC (Akaike, 1980)を導入し、これを最小化することによって最適な方向スペクトルを推定できるように工夫している。橋本・徳田(1998)は、このベイズ型モデルを応用した海洋短波レーダーの方向スペクトル推定法について、推定精度や有効性、適用性に関する数値シミュレーションを行い、ベイズ型モデルによる方向スペクトルの推定が可能であることを数値的に示している。

3. 海洋短波レーダーによる海象観測に関する国際共同研究プロジェクト(SCAWVEX)

SCAWVEX は英国を含む欧州4カ国の研究者らが実施した EC による共同研究プロジェクトである。SCAWVEX では、海洋短波 (HF) レーダー、SAR、マイクロ波高度計、Xバンドレーダー、波高計、流速計、水圧計、ADCP などの多くの計測機器を用いて、波浪と流れの時空間変動を計測し、波浪や流れの特性を検討すると共にそれぞれの計測機器の特性について検討している。SCAWVEX では、英国の Holderness、オランダの Massmond および Patten において4度の共同観測が実施されたが、本研究では1995年12月～1996年1月にかけて実施された英国の Holderness での観測の内、1995年12月21日14時の観測データを用いて海洋短波レーダーによる方向スペクトルの推定を行った。

図-1は、1995年12月21日00時の欧州の天気図である。この日前後には、英国の西側に低気圧があり、英国東岸の北海に面する Holderness では、北からのうねりに加えて南東から風波が来襲する2方向波浪場が形成されていた。図-2は、HFレーダーの観測領域を示したものである。Holderness では、Master と Slave の2カ所に

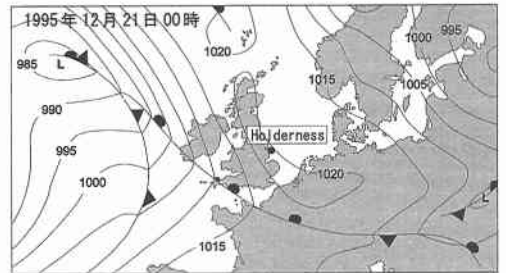


図-1 海洋短波レーダーの観測場所と天気図

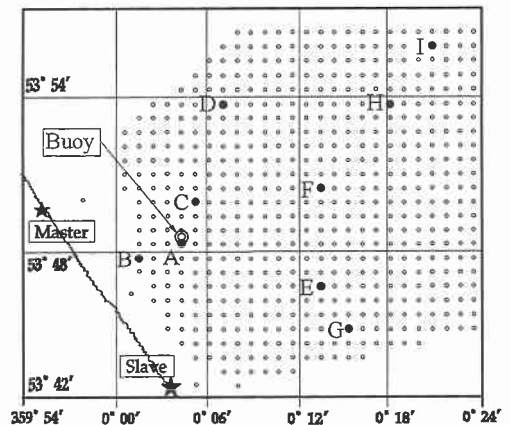


図-2 海洋短波レーダーの観測領域

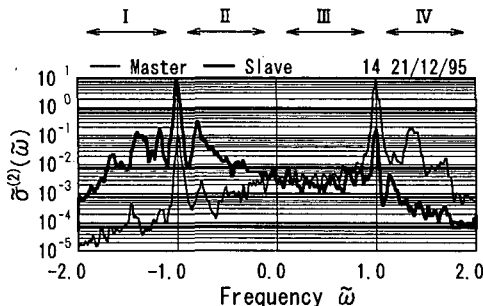


図-3 ドップラースペクトルの観測例

OSCR の HF レーダーを設置し、約 1 ヶ月間に渡りほぼ連続的な観測が実施された。OSCR の HF レーダーはパルスレーダー方式を採用しており、距離の特定に FMCW 方式を用いている我が国の HF レーダーとは異なるタイプのものである。観測は各局 5 分間で、20 分間のデータ処理時間を含めて繰り返し、1 時間単位で計測を実施している。なお、ドップラースペクトルの推定に際しては、512 個のデータを 75% ずつオーバーラップさせて用いることにより計 896 個のデータを処理している。図-2 中の◎は、ブイによる波浪観測地点である。SCAWVEX ではブイで計測されたデータを Longuet-Higgins ら (1961) の方法で解析し、その Fourier 係数が方向スペクトルに関するパラメータとして残されている。本研究では、この Fourier 係数をもとに、Kim ら (1994) の方法を用いて最大エントロピー法 (MEP) (橋本・小舟, 1985) による方向スペクトルで近似し、HF レーダーによる方向スペクトル推定値と比較した。

4. 方向スペクトルの推定法に関する検討

図-3 は、OSCR の HF レーダー (周波数 24.5 MHz) によるドップラースペクトルの一例で、図-2 中の A 点の Master と Slave の 2 地点でのドップラースペクトルを示している。前述のように、ドップラースペクトルの 2 次散乱成分は、共鳴条件を満たす無数の周波数・方向成分波の組合せからの寄与を表し、方向スペクトルとは非線形・非適切な積分方程式で関係づけられる。したがって、ドップラースペクトルのどの周波数成分を情報として用いるかによって、方向スペクトルの計算が不安定になったり、推定値や信頼性が異なってくる可能性がある。そこで本研究では、図-3 に示す 1 次散乱 ($\omega = \pm 1$) 近傍と $\omega = 0$ 近傍を除く領域 I, II, III, IV の周波数帯のドップラースペクトルを用い、各領域で用いる周波数範囲を変化させて方向スペクトルを推定し、妥当な方向スペクトルが推定可能となる条件を検討した。また、領域 I, II, III, IV の周波数帯の組み合わせを変えて方向スペクトルを推定し、同様な検討を行った。なお、方

向スペクトルの推定に際しては実務上の便を考え、計算毎に異なる初期値を用いるのはやめ、すべての計算で初期値を 0 として計算した。

(1) ドップラースペクトルの周波数範囲に関する検討

安定した方向スペクトルを推定するために必要なドップラースペクトルの周波数に関する条件は種々の検討の結果、以下の通りであった。

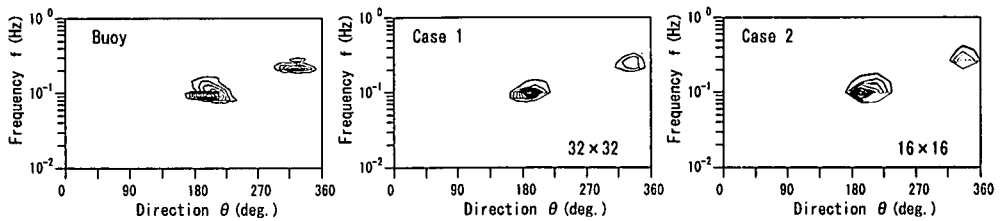
① 領域 I と IV で用いる周波数範囲を $1.85 \geq |\omega| \geq 1.15$ で固定し、領域 II と III で $0.85 \geq |\omega| \geq \omega_{\min}$ として下限値 $\omega_{\min}$ を 0.15~0.75 の範囲で変化させて計算し、下限値 $\omega_{\min}$ の許容範囲を検討した。その結果、下限値 $\omega_{\min}$ の上限は約 0.45 程度であり、 $\omega_{\min}$ をこれよりも大きく設定すれば方向スペクトルは高周波数側で発散する。 $\omega_{\min}$ をこれより小さく設定すれば、安定した方向スペクトルが推定される。

② 領域 II と III で用いる周波数範囲を $0.85 \geq |\omega| \geq 0.15$ で固定し、領域 I と IV で $\omega_{\max} \geq |\omega| \geq 1.15$ として上限値 $\omega_{\max}$ を 1.2~3.0 の範囲で変化させて計算し、上限値 $\omega_{\max}$ の許容範囲を検討した。その結果、上限値 $\omega_{\max}$ の下限は約 1.4 程度であり、 $\omega_{\max}$ をこれよりも小さく設定すれば、方向スペクトルは低周波数側で発散する。 $\omega_{\max}$ をこれより大きく設定すれば、安定した方向スペクトルが推定される。

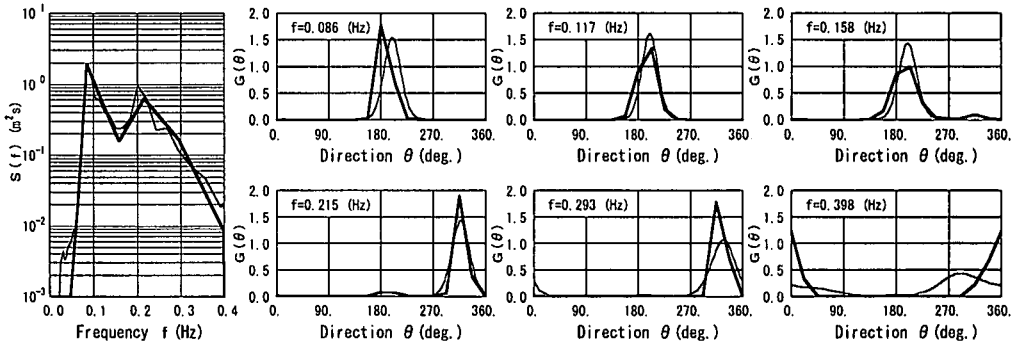
③ 領域 I と IV で用いる周波数範囲を $1.45 \geq |\omega| \geq \omega_{\min}$ 、領域 II と III で用いる周波数範囲を $\omega_{\max} \geq |\omega| \geq 0.4$ として、 $\omega_{\min}$ と $\omega_{\max}$ をそれぞれ 1.05~1.35 と 0.95~0.65 の範囲で変化させて計算し、1 次散乱近傍 ($|\omega| \approx 1$) で考慮すべき 2 次散乱成分の範囲を検討した。その結果、領域 I と IV の下限値 $\omega_{\min}$ の上限は約 1.17 程度、下限は約 1.07 程度、領域 II と III の上限値 $\omega_{\max}$ の上限は約 0.93 程度、下限は約 0.83 程度であり、 $\omega_{\min}$ と $\omega_{\max}$ をこれらの範囲外に設定すると、方向スペクトルは低周波数側で発散する。 $\omega_{\min}$ と $\omega_{\max}$ をこれらの範囲内で設定すれば、安定した方向スペクトルが推定される。

(2) ドップラースペクトルの組合せに関する検討

(1) の①~③の検討結果を参考にして、周波数範囲を領域 I と IV では $1.15 \leq |\omega| \leq 1.85$ 、領域 II と III では $0.15 \leq |\omega| \leq 0.85$ で固定し、ドップラースペクトルの領域 I~IV の組合せの相違による方向スペクトルの精度や安定性を検討した。その結果、①領域 I~IV のすべての領域のドップラースペクトル成分を用いた場合には安定した方向スペクトルが推定される。②周波数帯域を限定して用いる場合、2 つの 1 次散乱成分の内、大きい方の 1 次散乱成分を挟む 2 次散乱成分を含む領域のドップラースペクトルのみを用いれば、①と同様に安定した方向スペクトルが推定される。③エネルギーが小さい 1 次散乱成分を



図—4 周波数・方向分割数の相違による方向スペクトル推定値の比較



図—5 海洋短波レーダーによる周波数スペクトルと方向関数の推定値の比較 (細線は Buoy, 太線は HF レーダー)

挟む 2 次散乱成分のみを用いると計算が不安定になる。
④ 2 局のドップラスペクトルの内、1 局のドップラスペクトルは大きい 1 次散乱成分を挟む 2 次散乱成分を、もう 1 局のドップラスペクトルは、小さい 1 次散乱成分を挟む 2 次散乱成分を用いて方向スペクトルを推定すれば、方向スペクトルは推定されるものの、方向スペクトルの方向角に関するピークが誤った位置に推定される場合がある。

以上、(1)と(2)の検討により、ドップラスペクトルの大きい方の 1 次散乱成分を挟む 2 次散乱成分周辺で、方向スペクトルを推定する上で考慮すべき周波数帯の情報を含む適切な範囲のドップラスペクトルの 2 次散乱成分を用いれば安定した方向スペクトルを推定できることが分かる。また、1 次散乱成分から大きく離れた位置の 2 次散乱成分は方向スペクトルの精度向上には殆ど寄与しないことから、計算時間の便を考慮して推定値が不安定にならない範囲で適切な周波数範囲を設定することが望ましい。

(3) 方向スペクトルの周波数・方向分割数に関する検討

ベイズ法では方向スペクトルに周波数と方向角に関する離散的な一定値関数を仮定しており、周波数分割数を M 、方向分割数を N とすると $M \times N$ 個の未知パラメータを含む方程式を解く必要がある。実務上の便を考えると、あまり大きな分割数を設定し、多大な計算時間を費やすことはできない。そこで、ここでは $M=N=32$ と $M=N=$

16 の 2 ケースについて計算し、精度の比較を行った。ただし、ここでは方向角に関しては $0 \sim 2\pi$ の範囲を等分割し、周波数に関しては $0.01 \sim 1.0$ (Hz) の範囲を対数上で等分割になるように設定した。

図—4 は $M=N=32$ (Case 1) と $M=N=16$ (Case 2) の場合の方向スペクトル推定結果をブイ (Buoy) で観測された方向スペクトル推定値と比較したものである。ここでは SCAWVEX の表示に従い、波が進む向きを波向として表示した。図—4 に見られるように、Buoy では約 200° 方向へうねり、約 300° 方向へ風波が伝播する 2 方向波浪場が推定されており、HF レーダーによる Case 1 と Case 2 の場合にも妥当な位置に 2 つのエネルギーピークが推定されている。

図—5 は図—4 の Case 2 の周波数スペクトルと方向関数を Buoy の推定値と比較したものである。図—5 中の細線が Buoy の推定値、太線が HF レーダーによる推定値である。図—5 に見られるように、周波数スペクトルには 2 つの卓越したピークが見られ、妥当な位置に推定されている。一方、方向関数は $f=0.398$ (Hz) ではピーク位置が異なっているが、エネルギーの卓越した他の周波数ではほぼ妥当な位置にピークが推定されており、方向分割数を 16 と粗く設定したにも関わらず、実務上、許容し得る範囲の推定結果であると考えられる。

ベイズ法で方向スペクトルを推定する場合、 $M=N=16$ の場合には通常の PC を用いて数分以内の計算であり、実務上の許容範囲である。一方、 $M=N=32$ の場合

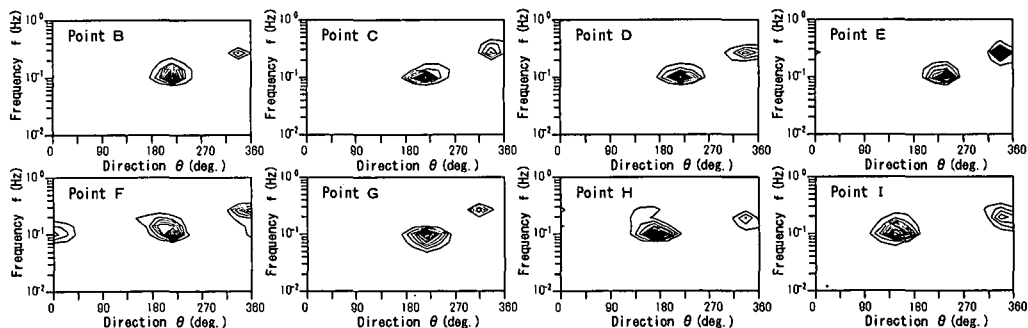


図-6 海洋短波レーダーによる方向スペクトル推定例

には数十分の計算時間を要することから、現時点でのリアルタイム処理には不向きである。今後、計算時間の向上を目的とした更なる改良を行う必要がある。

(4) 種々のドップラースペクトルへの適用例

ベイズ法の適用性を検討するため、図-2に示した観測領域内の565測点全てのドップラースペクトルを対象として方向スペクトルを推定した。その結果、計算が途中で発散し、計算不能になったケースは僅か1ケースのみで、他の564測点ではベイズ法の繰り返し計算による収束解が得られた。しかしながら、推定値の全てが図-4と類似した推定値を示したわけではなく、1方向波浪を示す例や3つ以上のスペクトルピークを示す例などの様々な推定値が得られた。

図-3に見られるように、ドップラースペクトルの2次散乱成分は1次散乱成分に比べて、エネルギーレベルが極めて低く、外乱の影響を受けやすい。このため、全てのドップラースペクトルの2次散乱成分から妥当な方向スペクトルを推定できる保証はない。今回の検討結果では、図-2の観測領域内で妥当な方向スペクトルが推定された測点は領域内の広い範囲に分布しているものの、局所的には妥当な測点はある範囲に集中的に分布する傾向が見られた。図-6は図-4と類似した推定値を示した例を示したものである。それぞれの測点は図-2に示した測点B～Iに対応している。図-2の測点に見られるように、妥当な方向スペクトルは領域内の広い範囲に分布していることがわかる。

5. おわりに

欧州の国際共同研究プロジェクト SCAWVEX で得られたドップラースペクトルにベイズ法を適用し、方向スペクトルを推定した。その結果、ベイズ法により多くの妥当な方向スペクトルが推定され、ベイズ法の妥当性や適用性が確認できた。しかしながら、方向スペクトルの精度はドップラースペクトルの精度に強く依存する。本研究では SCAWVEX の高精度なドップラースペクトル

を用いて方向スペクトルの推定を行ったが、我が国においても海洋短波レーダーによる気象・海象に関する広域観測技術を向上させて行くためには、より精度の良いドップラースペクトルの観測・解析技術の向上が不可欠である。今後、海洋短波レーダーを用いた現地観測を実施し、この方面での研究を進める予定である。

参考文献

- 橋本典明・小舟浩治 (1985): 最大エントロピー原理 (MEP) を用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第3号, pp. 123-145.
- 橋本典明 (1987): ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 126-130.
- 橋本典明・徳田正幸 (1998): 海洋短波レーダー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.
- 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.
- Barrick, D. E. (1977): Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra, Radio Science, Vol. 12, No. 3, pp. 415-424.
- Howell, R. and J. Walsh (1993): Measurement of ocean wave spectra using narrow-beam HF radar, IEEE J. Oceanic Eng., Vol. 18, pp. 296-305.
- Hisaki, Y. (1996): Nonlinear inversion of the integral equation to estimate ocean wave spectra from HF radar, Radio Sci., Vol. 31, No. 1, pp. 25-39.
- Kim, T., L.-H. Lin and H. Wang (1994): Application of Maximum Entropy Method to the Real Sea Data, Coastal Engineering 1994, Vol. 1, ASCE, pp. 340-355.
- Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright and N. D. Smith (1961): Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, Ocean Wave Spectra, Prentice-Hall, Inc., pp. 111-136.
- 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.
- Wyatt, L. R. (1997): The ocean wave directional spectrum, Oceanography, Vol. 10, No. 2, pp. 85-89.