

海洋短波レーダーにおける実用的な方向スペクトル推定法の開発

Development of A Practical Method for Estimating Directional Spectrum from HF Radar Backscatter

橋本典明¹・Lukijanto²・山城 賢³・児島正一郎⁴

Noriaki HASHIMOTO, LUKIJANTO, Masaru YAMASHIRO and Syoichiro KOJIMA

For the purpose of developing a practical method for estimating directional wave spectrum from HF radar sea-echo Doppler spectrum, a Bayesian method proposed by Hashimoto and Tokuda (1998) is modified and improved. In the method, a formulation of directional spectrum is characterized by an exponential function having the power expressed by a Fourier series over the directional range, while being assumed to be a piecewise-constant function over the frequency range. The method is examined using numerical simulation, with its validity being discussed. The result shows that the method has advantage in that it requires less memory and shorter computation time in practical applications.

1. はじめに

近年, 広域的海象観測を目的とした海洋短波レーダーの技術開発に期待がよせられている。国土交通省においても, 関東, 中部, 近畿および九州地方整備局で海洋短波レーダーの導入・整備が進められ, 観測情報の提供が行われている。しかし, いずれの地点においても主として流況観測情報のみが利用されているに過ぎず, 必ずしも海洋短波レーダーが有する全機能の有効利用が図られていないのが現状である。これは, 海洋短波レーダーによる流況観測技術は既に確立・実用化されているが, 波浪や風に関する観測・解析技術が実務に供し得るレベルで確立されていないためである。本研究では, 海洋短波レーダーにおける既往の方向スペクトル推定法の欠点を解消し, 短時間に精度の良い方向スペクトルを推定可能な実用的な推定法を開発することにより, 現在各所で導入されている, あるいは導入予定の海洋短波レーダーによる広域的海象観測技術の高度化に資することを目的としている。

2. 既往の研究

海洋短波レーダーにおける方向スペクトル推定法には, Wyatt (1990) が開発した Chahine-Twomey アルゴリズムに基づく解析法, Hisaki (1996) が開発した非線形最適化法を用いる解析法, および橋本・徳田 (1998) が開発したベイズ法がある。Wyattの方法は, 計算が比較的簡便であることから, 欧州では実務に用いられている。Hisakiと橋本・徳田の方法は, 方向スペクトルを構成する周波数と方向角に関する各エネルギー成分を離散的な一定値関数として扱い, これらを未知パラメータとす

る非線形積分方程式を繰り返し計算によって解くものである。橋本・徳田の方法は, Wyattの方法に比べて高精度であるが, 計算時間を要する欠点があり (橋本ら, 2000), 海洋短波レーダーで得られるような時空間的に膨大な情報を短時間に処理・解析する上で, 実務への適用は必ずしも容易ではなく, これまで限定的な利用にとどまっていた。

3. ドップラスペクトルと方向スペクトルの関係

海洋短波レーダーの2次散乱成分 $\tilde{\sigma}^{(2)}(\tilde{\omega})$ から方向スペクトル $S(f, \theta)$ を推定するための基礎式は次式で表される (Lipa and Barrick, 1982)。

$$\tilde{\sigma}^{(2)}(\tilde{\omega}) = \int_0^{\theta_0} G(\theta_1, \tilde{\omega}) d\theta_1 \quad (1)$$

ここに,

$$G(\theta_1, \tilde{\omega}) = 16\pi \left[|\tilde{\Gamma}|^2 \left\{ \tilde{S}(m_1 \tilde{\mathbf{k}}_1) \tilde{S}(m_2 \tilde{\mathbf{k}}_2) + \tilde{S}(m_1 \tilde{\mathbf{k}}_1^*) \tilde{S}(m_2 \tilde{\mathbf{k}}_2^*) \right\} y^3 \left| dy/dh \right| \right]_{y=\hat{y}} \quad (2)$$

$$\left| \frac{dy}{dh} \right| = \left| 1 + m_1 m_2 \frac{y(y^2 + \cos \theta_1)}{(y^4 + 2y^2 \cos \theta_1 + 1)^{3/4}} \right|^{-1} \quad (3)$$

である。 $\tilde{\omega}$ は角周波数, $\tilde{\mathbf{k}}_i$ は波数ベクトル, $\tilde{\Gamma}$ は結合係数 (Barrick, 1972), $\tilde{S}(m_i \tilde{\mathbf{k}}_i)$ は波浪の波数スペクトルであり, 電波の波数ベクトルを $\mathbf{k}_0$, p と q をレーダーのビーム軸方向およびそれと直交する座標とすると, $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ は,

$$\mathbf{k}_1 = (p - k_0, q), \quad \mathbf{k}_2 = (-p - k_0, -q) \quad (4)$$

である。また, m_1, m_2 は ω の値域に依存する符号 (± 1) である。これらの諸量は k_0 とブラッグ角周波数 $\omega_B (= \sqrt{2gk_0})$ を用いて次式のように無次元化されている。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\omega} &= \omega / \omega_B & \tilde{\mathbf{k}} &= \mathbf{k} / (2k_0) \\ \tilde{\Gamma} &= \Gamma / (2k_0), & \tilde{S}(\tilde{\mathbf{k}}) &= (2k_0)^4 S(\mathbf{k}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

また, $y = \sqrt{k_1}$ であり, $\hat{y}$ は,

1 フェロー 博(工) 九州大学大学院教授
2 学生会員 九州大学大学院
3 正会員 博(工) 九州大学大学院助教
4 正会員 博(工) 情報通信研究機構

$$\tilde{\omega} - m_1 y - m_2 (y^4 + 2y^2 \cos \theta_1 + 1)^{1/4} = 0 \quad (6)$$

を解いて得られる $y = \hat{y}$ である。 $\hat{\mathbf{k}}_i^*$ は $\hat{\mathbf{k}}_i$ とレーダーのビーム軸 (p 軸) に対して対称な波数ベクトルであり、積分範囲の上限 θ_{i1} は、 $\tilde{\omega} \leq 2$ のとき $\theta_{i1} = \pi$ 、 $\tilde{\omega} > 2$ のとき $\theta_{i1} = \pi - \cos^{-1}(2/\tilde{\omega}^2)$ で与えられる。なお、波数ベクトル $S(\mathbf{k})$ と方向スペクトル $S(f, \theta)$ は

$$S(\mathbf{k}) = \frac{g^2}{2^3 \pi^4 f^3} S(f, \theta) \quad (7)$$

の関係がある。方向スペクトル $S(f, \theta)$ は、観測して得られた $\hat{\sigma}^{(2)}(\tilde{\omega})$ をもとに式(1)を逆解析して推定される。

4. ベイズ法を改良した実用的方向スペクトル推定法

方向スペクトル $S(f, \theta)$ は一般に $S(f, \theta) \geq 0$ であるが、ベイズ法(橋本・徳田, 1998)では便宜的に $S(f, \theta) > 0$ と仮定し、指数部に離散的な一定値関数を有する指数関数 x_{ij} を用いて次式で方向スペクトルを近似した。

$$S(f, \theta) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \exp(x_{ij}) \delta_{i,j}(f, \theta) \quad (8)$$

ここに、 $x_{ij} = \ln S(f_i, \theta_j)$ 、 M は周波数分割数、 N は方向分割数で、

$$\delta_{i,j}(f, \theta) = \begin{cases} 1: & f_{i-1} \leq f < f_i \text{ and } \theta_{j-1} \leq \theta < \theta_j \\ 0: & \text{その他} \end{cases} \quad (9)$$

である。ただし、周波数 f と方向角 θ は、それぞれ次式によって離散化する。

$$\mu_i = \ln f_i = \ln f_{i-1} + \Delta f, \quad \theta_j = \theta_{j-1} + \Delta \theta \quad (10)$$

式(8)で方向スペクトルを近似する場合、 $M \times N$ 個の未知パラメータ x_{ij} を推定する問題に帰着する。ただしこの場合、一般に解くべき方程式の数に比べて未知パラメータの数が多く非適切な逆問題となるため、エネルギー分布を構成する離散的な一定値関数 x_{ij} が、周波数と方向角に関して滑らかな連続関数であるという期待を先験条件として付加して最適解を求めている。

本研究では式(8)の代わりに、方向スペクトルの直接測定法に適用可能な方法として橋本・小舟(1985)が開発した最大エントロピー原理法(MEP)を参考にして、方向スペクトルを周波数に関しては離散的に扱い、方向角に関してはその指数部がFourier級数で表される指数関数を用いて次式のように近似する。

$$S(f_i, \theta) = \exp \left[a_0(f_i) + \sum_{k=1}^K \{ a_k(f_i) \cos k\theta + b_k(f_i) \sin k\theta \} \right] \quad (11)$$

ここに、 f_i は離散化した周波数で、式(10)と同様に離散化する。 $a_k(f_i)$ 、 $b_k(f_i)$ は求めるべき未知パラメータである。この場合、周波数分割数を M 、級数の次数を K とすると、未知パラメータの数は $M \times (2K+1)$ になる。橋本・小舟(1985)は、式(11)の関数形は単峰型の方向スペ

クトルの場合には $K=1$ でも様々な方向集中度の方向スペクトルを近似でき、 $K=2$ の場合には双峰型の方向スペクトルをも近似できることを示している。したがって、高々 $K=2$ でも実用上十分な精度で実際の方向スペクトルを近似できるものと考えられる。すなわち、式(11)を用いれば未知パラメータ数は最大 ($K=2$) でも $5M$ となり、式(8)に比べて大幅な未知パラメータ数の削減が可能になる。

式(11)を式(1)に代入すれば、式(1)は未知パラメータ、 $a_k(f_i)$ 、 $b_k(f_i)$ を含む積分方程式になる。さらに、積分を総和 Σ に置き換えて離散化すれば、積分方程式は非線形代数方程式で近似できる。しかしながら、式(1)の積分は、式(6)の制約により、 (f, θ) 平面上で特定のパスを通過する積分となる。また、式(1)は特異点を含むことから、特異点近傍では細かい刻み幅で高精度な計算が必要である。そこで式(1)の離散化に際しては、Hisaki(1996)と同様に、数値積分する際のパス上の方向スペクトル値を、その近傍の周波数に関する格子点上の方向スペクトル値を用いて線形内挿して、

$$S(\mu, \theta) = (1 - \zeta) S(\mu, \theta) + \zeta S(\mu + \zeta, \theta) \quad (12)$$

(ここに、 $\mu = \ln f$ 、 $0 \leq \zeta \leq 1$) で近似し、式(1)を θ_i に関して任意の精度で離散化できるようにした。さらに、ドップラースペクトルの誤差 ε_k を考慮し、最終的には、式(1)の積分方程式は、未知数 $\mathbf{X} = [a_k(f_i), b_k(f_i)]^T$ を含む次式で表される非線形代数方程式で近似される。

$$\hat{\sigma}_l^{(2)} = F_l(\mathbf{X}) + \varepsilon_l \quad (13)$$

ここに、サフィックス l は、ドップラー周波数 $\tilde{\omega}_l$ ($l=1, \dots, L$) における値を表す。

ここで、各ドップラー周波数 $\tilde{\omega}_l$ 毎の誤差 ε_l ($l=1, \dots, L$) は互いに独立であり、未知の分散に従うものとする。このとき、 $\hat{\sigma}_l^{(2)}$ ($l=1, \dots, L$) が与えられれば、 $\mathbf{X}$ 、 λ^2 に関する尤度は、

$$L(\mathbf{X}; \lambda^2) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\lambda)^L} \exp \left[-\frac{1}{2\lambda^2} \sum_{l=1}^L \{ \hat{\sigma}_l^{(2)} - F_l(\mathbf{X}) \}^2 \right] \quad (14)$$

で与えられる。

以上の定式化では、方向スペクトルは方向角に関しては連続関数であるが、周波数に関しては離散的な一定値関数で近似した。したがってこの段階では、各周波数間のエネルギーの連続性については何ら考慮されていない。波浪の線形性からは各周波数成分のエネルギー分布はそれぞれ独立であると見なされるが、方向スペクトルが周波数に関して不連続なエネルギー分布をしているとは考えにくい。また、一般に方向スペクトルは周波数および方向角に関して滑らかな連続関数であると見なされている。したがって、ここでは方向スペクトル $S(f, \theta)$ が滑らかであるという仮定の表現として、

$$\left. \begin{aligned} a_k(f_{i+1}) - 2a_k(f_i) + a_k(f_{i-1}) \\ b_k(f_{i+1}) - 2b_k(f_i) + b_k(f_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

が小さいという期待を先験条件として付加する.

式(15)の条件は, 解析対象周波数の下限 ($i=1$) および上限 ($i=M$) を除く全ての周波数で設定可能であり, $(M-2) \times (2K+1)$ 個の式が設定される. しかし下限 ($i=1$) および上限 ($i=M$) では設定不可であり, $a_k(f_1)$, $b_k(f_1)$ および $a_k(f_M)$, $b_k(f_M)$ に関する $2 \times (2K+1)$ 個のパラメータについては独立な支配パラメータとして扱わなければならない. すなわち, 本方法で方向スペクトルを推定する場合, $K=1$ の場合には6個, $K=2$ の場合には10個のパラメータが解の特性を支配する一種のコントロールパラメータになる.

いま, 海洋短波レーダーによるドップラースペクトルが与えられ, その内 L 個の2次散乱成分 $\tilde{\sigma}^{(2)}(\tilde{\omega}_i)$, ($i=1, \dots, L$) から方向スペクトルを推定しようとする場合, $L+(M-2) \times (2K+1) \geq M \times (2K+1)$, すなわち, $L \geq 2 \times (2K+1)$ ならば, 方程式の数が未知パラメータ数よりも多いことから, これらのコントロールパラメータに先験条件を付加せずに, 後で述べる最小自乗法を適用し, 解 $\mathbf{X}$ に含ませて解くことも可能である. しかし, そのようにして先験条件を付加せずにコントロールパラメータを推定すると, 解 $\mathbf{X}$ が不安定になる原因になる可能性がある. そこでここでは便宜的に,

$$\left. \begin{aligned} a_k(f_{i+1}) - a_k(f_i) \\ b_k(f_{i+1}) - b_k(f_i) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

が小さいという期待を先験条件として与えることとした. これは, 方向スペクトルの低周波数側と高周波数側の端部では周波数に関してエネルギー変化が小さく, ほぼ同程度のエネルギー分布となると仮定したものである. この仮定の妥当性については後で検討する.

作用行列 $\mathbf{D}$ を導入して, 式(15)と(16)をまとめて

$$\|\mathbf{D}\mathbf{X}\|^2 \quad (17)$$

のように行列表示すると, 式(17)が小さいほど方向スペクトルの推定値は滑らかになると考えられる. したがって, 方向スペクトル $S(f, \theta)$ の推定値としては, 式(17)をあまり大きくしない範囲で尤度 (式(14)) の大きいものが望ましい. これを定式化すると, 適当なパラメータ u^2 (超パラメータ) を用いて,

$$\ln L(\mathbf{X}; \lambda^2) - \frac{u^2}{2\lambda^2} \|\mathbf{D}\mathbf{X}\|^2 \quad (18)$$

を最大化する $\mathbf{X} = [a_k(f_i), b_k(f_i)]^T$ を求めればよい. これはベイズの推論方法において, 事後分布 $p_{\text{POST}}(\cdot)$ の

$$p_{\text{POST}}(\mathbf{X} | u^2, \lambda^2) = L(\mathbf{X}; \lambda^2) p(\mathbf{X} | u^2, \lambda^2) \quad (19)$$

の関係式において, $\mathbf{X} = [a_k(f_i), b_k(f_i)]^T$ の事前分布として,

$$p(\mathbf{X} | u^2, \lambda^2) = \left(\frac{u}{\sqrt{2\pi}\lambda} \right)^{M \times (2K+1)} \exp \left\{ -\frac{u^2}{2\lambda^2} \|\mathbf{D}\mathbf{X}\|^2 \right\} \quad (20)$$

を想定したことにほかならない.

u^2 を与えれば, 式(20)を最大化する $\mathbf{X}$ は λ^2 に無関係に決まり,

$$\sum_{i=1}^L \left\{ \tilde{\sigma}_i^{(2)} - F_i(\mathbf{X}) \right\}^2 + u^2 \|\mathbf{D}\mathbf{X}\|^2 \quad (21)$$

を最小化することにより得られる. また, u の決定と λ^2 の推定は次式で表される ABIC (赤池のベイズ型情報量基準, Akaike, 1980) の最小化によれば, 解の確からしさと滑らかさの両方の観点から望ましい u が自動的に決められる.

$$\text{ABIC} = -2 \ln \int L(\mathbf{X} | \lambda^2) p(\mathbf{X} | u^2, \lambda^2) d\mathbf{X} \quad (22)$$

5. 数値計算法

4. で述べた方法を用いて方向スペクトルを推定する場合, 式(21)の最小化および式(22)の積分と最小化を実行しなければならない. しかしながら, いまの場合それらを解析的に行うことは不可能である. そこで, ここでは橋本・徳田 (1998) と同様に, 式(21)を線形化し, 繰り返し計算によって最適解 $\hat{\mathbf{X}}$ を推定する方法を採用する.

いま, $\mathbf{X}_0$ が $\mathbf{X} = [a_k(f_i), b_k(f_i)]^T$ の最適解 $\hat{\mathbf{X}}$ に十分近いものとして $\mathbf{X}_0$ のまわりで $F_k(\mathbf{X})$ を Taylor 展開すると, 次式で表される.

$$F_k(\mathbf{X}) = F_k(\mathbf{X}_0) + \mathbf{G}_k(\mathbf{X}_0)(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (23)$$

ここに,

$$\mathbf{G}_k(\mathbf{X}_0) = \left[\partial F_k(\mathbf{X}) / \partial x_{1,1}, \dots, \partial F_k(\mathbf{X}) / \partial x_{L,L} \right]_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_0} \quad (24)$$

である. 式(23)を用い, 式(13)を ($i=1, \dots, L$) の成分をまとめて行列表示すると, 式(13)は $\mathbf{X}$ に関して線形な次式で表される.

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{E} \quad (25)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} &= [\mathbf{G}_1(\mathbf{X}_0), \dots, \mathbf{G}_K(\mathbf{X}_0)] \\ \mathbf{B} &= \left[\tilde{\sigma}_1^{(2)} - F_1(\mathbf{X}_0) + \mathbf{G}_1(\mathbf{X}_0)\mathbf{X}_0, \right. \\ &\quad \left. \dots, \tilde{\sigma}_K^{(2)} - F_K(\mathbf{X}_0) + \mathbf{G}_K(\mathbf{X}_0)\mathbf{X}_0 \right]^T \\ \mathbf{E} &= [\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_K]^T \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

である. したがって, 式(21)は次式の様に線形化される.

$$W(\mathbf{X}) = \|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{B}\|^2 + u^2 \|\mathbf{D}\mathbf{X}\|^2 \quad (27)$$

式(27)と(22)を最小化して最適解 $\hat{\mathbf{X}}$ を推定する方法は, 橋本・徳田 (1998) に述べられており, ここでは省略する.

以上の計算法では, 式(27)に最小自乗法を適用し, 直接的に最適解 $\hat{\mathbf{X}}$ を推定するが, 式(27)をやや変形した式を用いて最適解を求めることも可能である. いま,

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_0 \text{ と置くと, 式(23)は}$$

$$F_k(\mathbf{X}) = F_k(\mathbf{X}_0) + \mathbf{G}_k(\mathbf{X}_0)\Delta \mathbf{X} \quad (28)$$

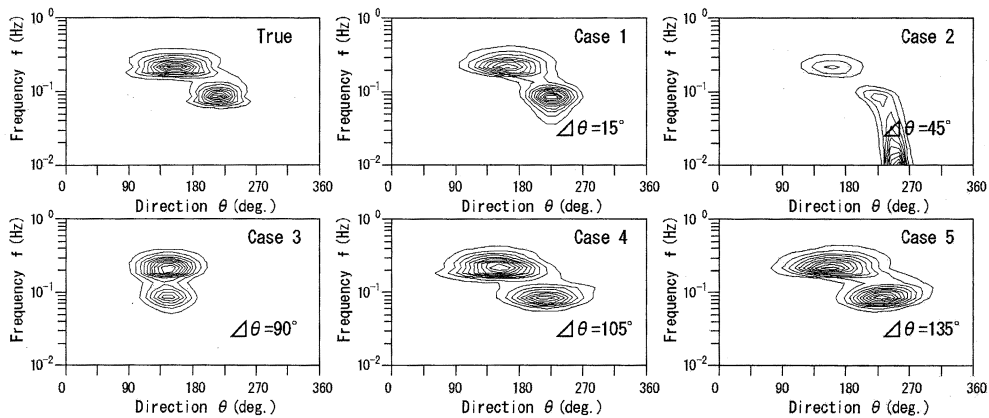


図-1 卓越周波数が異なる2方向波浪を対象とした計算例

と書けるから、 $\mathbf{B} = [\tilde{\sigma}_1^{(2)} - F_1(\mathbf{X}_0), \dots, \tilde{\sigma}_K^{(2)} - F_K(\mathbf{X}_0)]^T$ と定義し直すと、式(25)は、 $\mathbf{B} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} + \mathbf{E}$ と書ける。そこで、式(15)と(16)の先験条件の代わりに、

$$\left. \begin{aligned} \Delta a_k(f_{i+1}) - 2\Delta a_k(f_i) + \Delta a_k(f_{i-1}) \\ \Delta b_k(f_{i+1}) - 2\Delta b_k(f_i) + \Delta b_k(f_{i-1}) \end{aligned} \right\}, \text{ および,}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta a_k(f_{i+1}) - \Delta a_k(f_i) \\ \Delta b_k(f_{i+1}) - \Delta b_k(f_i) \end{aligned} \right\} \text{ が小さいという期待を先験条件}$$

として加える。すなわち、繰り返し計算によって修正される補正量が周波数に関して連続であるという期待を先験条件とする。すなわち、

$$W(\Delta \mathbf{X}) = \|\mathbf{A} \Delta \mathbf{X} - \mathbf{B}\|^2 + u^2 \|\mathbf{D} \Delta \mathbf{X}\|^2 \quad (29)$$

とすると、 $\Delta \mathbf{X}$ を推定するための方程式になる。式(27)の代わりに、式(29)を用いても最適解 $\hat{\Delta \mathbf{X}}$ を推定することができる。

6. 数値シミュレーションによる検討

4.と5.で述べた方向スペクトル推定法の精度や適用性を数値シミュレーションで検討した。数値シミュレーションでは、先ず任意の方向スペクトル形を仮定して式(1)に代入し、数値積分してドップラースペクトルの2次散乱成分 $\sigma^{(2)}(\omega)$ を計算した。次にこの2次散乱成分 $\sigma^{(2)}(\omega)$ をもとに5.で述べた方法で方向スペクトルを推定した。シミュレーションでは、短波レーダーの周波数を24.515 MHzで固定し、2基のレーダーから照射する電波の交差角を種々変えた条件で検討した。なお、本検討では、式(27)と(22)を最小化する際の繰り返し計算の初期値として、全ケースで $\mathbf{X}_0 = [a_k(f_i), b_k(f_i)]^T = \mathbf{0}$ として計算した。

図-1は卓越周波数が異なる2方向波浪を対象とした例で、各波浪系の有義波高・周期・波向・ S_{max} はそれぞれ2m, 5秒, 150°, 10と1m, 12秒, 210°, 25である。図-1左上にシミュレーションに用いた真の方向スペクトル

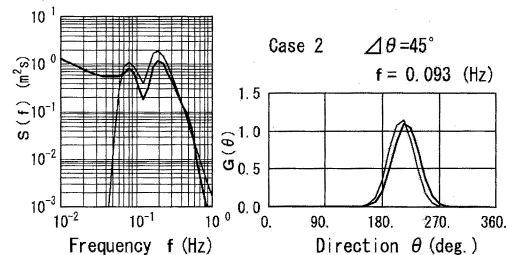


図-2 周波数スペクトルと方向関数の比較

(True)を示す。Case 1~Case 5は、2基のレーダーから照射した電波の交差角をそれぞれ $\Delta\theta = 15^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 135^\circ$ として、式(27)と(22)を用いて推定した結果である。なお、この例は卓越周波数が異なる2方向波浪であり各周波数帯の方向角に関するエネルギー分布は単峰型で近似できることから、 $K=1$ として推定した。図-1に見られるように、 $\Delta\theta = 15^\circ, 105^\circ, 135^\circ$ ではTrueに近い2方向波浪が精度良く推定されているが、 $\Delta\theta = 45^\circ, 90^\circ$ の例は不適切であり、いずれの例も低周波数側のピークが異なる位置に推定されている。図-2は図-1中の Case 2 ($\Delta\theta = 45^\circ$)の周波数スペクトル $S(f)$ と、周波数 $f = 0.093$ (Hz)の方向関数を図示したものである。図-2中の細線は真の周波数スペクトルと方向関数で、太線は推定値である。低周波数側の卓越周波数近傍 ($f = 0.093$ (Hz))の方向関数は精度良く推定されているが、周波数スペクトルでは、 $f = 0.08$ (Hz)と $f = 0.2$ (Hz)の2つのエネルギーピークは検出されているものの、低周波数側で過大なエネルギーが推定されており、不適切な結果となっている。なお、図-1の $\Delta\theta = 45^\circ$ と 90° に見られる不適切な結果は、式(16)で導入した周波数端部の先験条件と式(27)と(22)の繰り返し計算の初期値に依存しており、適切な初期値を用いればば妥当な結果が得られることを確認している。

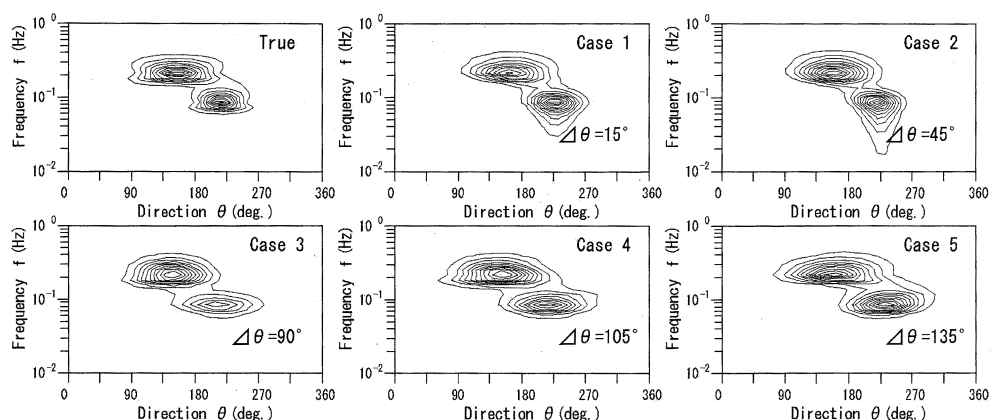


図-3 卓越周波数が異なる2方向波浪を対象とした計算例

図-3は図-1と同じ条件を対象として、式(27)の代わりに式(29)を用いて推定した結果である。図-1では不適切であった $\Delta\theta=45^\circ$, 90° の例もほぼ妥当な結果となっている。図-4に図-3のCase 3 ($\Delta\theta=90^\circ$) の周波数スペクトル $S(f)$ と、周波数 $f=0.093(\text{Hz})$ の方向関数 $G(\theta)$ を示す。この例でも周波数スペクトルの低周波数側でやや過大なエネルギーが推定されているが、周波数スペクトル、方向関数ともエネルギーピーク位置と大きさはほぼ真値(True)と一致しており実用上十分な精度で推定されていることが分かる。

この他にも幾つかの方向スペクトル形を対象として同様の検討を行ったが、式(27)を用いるよりも式(29)を用いる方が計算の安定性が高かった。なお、図-1～図-4に示した結果は、橋本・徳田(1998)で検討した条件と同一であるが、本研究で提案した方法は既往の方法よりも大幅に短い演算時間で方向スペクトルを推定可能であった。

7. おわりに

方向スペクトルにおける周波数スペクトルについては離散的関数、方向関数については Fourier 級数を指数部に有する指数関数を用いることにより、海洋短波レーダーのドップラースペクトルから精度の良い方向スペクトルを推定可能な方法を開発した。本方法は既往のベイズ法に比べて大幅に記憶容量を削減し、演算時間を短縮した実用的な方向スペクトル推定法であると言える。

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, p.123-145.

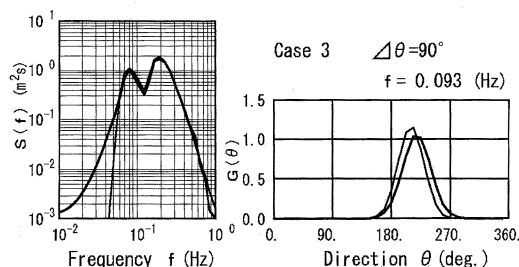


図-4 周波数スペクトルと方向関数の比較

- 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, 土木学会, 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.
- 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.
- Lipa, B. J. and Barrick, D.E. (1982): Analysis Methods for Narrow-Beam High-Frequency Radar Sea Echo, NOAA Technical Report ERL 420-WPL 56, pp.1-55.
- Wyatt, L. (1990): A relaxation method for integral inversion applied to HF radar measurement of the ocean wave directional spectra, Int. Jour. Remote Sensing, Vol.11 pp.1481-1494.