短波海洋レーダ観測データのエネルギー補正による波浪推定精度の向上

Improvement Accuracy of Wave Parameters Estimated with Energy Calibration in HF Oceanographic Radar Data

永松 宏¹・橋本典明²・金津伸好³・岡 秀行⁴・藤田裕一⁵・日向博文⁶

Hiroshi NAGAMATSU, Noriaki HASHIMOTO, Nobuyoshi KANATSU
Hideyuki OKA, Yuiti FUJITA and Hirofumi HINATA

The accuracy of HF radar-measured wave parameters along the coast of GOTO Islands is examined. Doppler spectra were obtained from two radars, measured at Takasaki-bana and Tsuwazaki, in winter (from December 2007 to January 2008). Using Barrick's method(1977), we estimated significant wave heights and periods from hourly Doppler spectra. A comparison of those estimated from two radars shows different wave height. Hence, we calibrated Doppler spectra so that the significant wave height from two radars might become equal height. Furthermore, we applied the calibrated Doppler spectra to a Bayesian method (Hashimoto and Tokuda, 1998). As a result, the wave parameters estimated by Bayesian method were in good agreement with those computed by WAM, and suitable directional wave spectra can be estimated.

1. はじめに

短波海洋レーダによる流況観測技術は、多くの実証観測をもとに、既に確立・実用化されており、国土交通省においては各地方整備局で流れ情報の提供や海上浮遊ゴミの回収効率化に向けた利活用を行っている（日向ら、2008など）。一方、短波海洋レーダを利用した波浪観測技術は、Wyatt（1990）、Hisaki（1996）、橋本・徳田（1998）、橋本ら（2000, 2008, 2010）により実用的な波浪推定法が提案されているものの、実証観測例が少ないため、現地適用性の向上検討や実用化が遅れている。

欧米では1970年代に海洋レーダのドップラスペクトルデータをもとに有義波高・有義波周期を推定するバリック法が開発された（Barrick, 1977）。その後、Wyattは、Chahine-Twomeyアルゴリズムにもとづいた方向スペクトル解析法を開発し（Wyatt, 1990）、この解析方法をECMAST SCAWVEX project（Surface Current and Wave Variability Experiments）に適用し、高精度な方向スペクトルが推定された事例を報告している（Wyatt, 1997）。

一方、わが国では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による方向スペクトル推定方法がある。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。その後、橋本ら（2000, 2008, 2010）はベイズ法の適用性を検討するため、前述のSCAWVEX projectの観測データにベイズ法を適用し、適用性の確認や推定式の見直しを行ってきた。しかし国内において外洋波浪を対象とした海洋レーダの観測データは少なく、国内データへの適用例はほとんどなかった。

そこで、本研究では五島列島で観測された短波海洋レーダのドップラスペクトルデータをもとに、バリック法およびベイズ法で有義波高・有義波周期を推定し、第三世代波浪推算法WAMの推算結果と比較した。この比較をもとに、ドップラスペクトルデータにエネルギー補正を施した。このエネルギー補正により、海洋レーダとWAMによる有義波高・有義波周期、方向スペクトルの推定値が良く一致したことから、今後の海洋レーダの波浪観測実用化に寄与できると考え、報告する次第である。

2. Barrick（1972）によるバリック法

海洋レーダで観測されるドップラスペクトルから波浪パラメータを推定する試みはBarrick（1972, 1977）が最初である。ドップラスペクトルの1次散乱成分 $\sigma^{(1)}(\omega)$ と2次散乱成分 $\sigma^{(2)}(\omega)$ はそれぞれ次式で表わされる。

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

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

1	修(水)	国際航業(株)	第一技術部	地球温暖化対策G
2	フェロー	博(工)	九州大学大学院教授	
3			国際航業(株)	第一技術部 地球温暖化対策G
4	正会員		国際航業(株)	技術担当部長
5			長野日本無線(株)	研究開発部
6	正会員	博(工)	国土技術政策総合研究所	沿岸海洋研究部

ここに 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, ω は角周波数, ω_b はブラッグ角周波数, m_1, m_2 は ω の値域に依存する符号 (± 1), 積分変数 p と q はそれぞれレーダ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 $k_1 = (p - k_0, q)$ と $k_2 = (-p - k_0, -q)$ とは $k_1 + k_2 = -2k_0$ 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, それぞれ次式で与えられる.

$$\Gamma_E = \frac{1}{2} \left[\frac{(k_1 \cdot k_0)(k_2 \cdot k_0) / k_0^2 - 2k_1 \cdot k_2}{\sqrt{k_1 \cdot k_2 - k_0 \Delta}} \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$\Gamma_H = \frac{-i}{2} \left[k_1 + k_2 - \frac{(k_1 k_2 - k_1 \cdot k_2)(\omega^2 + \omega_b^2)}{m_1 m_2 \sqrt{k_1 k_2 (\omega^2 - \omega_b^2)}} \right] \dots\dots\dots (4)$$

ここに 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.

Barrickは, 式(2)に含まれる2つの波数スペクトルのうち, 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一定値と仮定することにより積分の外に出した. これは波高が高くなると, 2次散乱の主要なエネルギーが1次散乱ピーク付近に卓越するため, 2次散乱に寄与する波長の小さい波浪成分波 $S(m_2 k_2)$ は, 1次散乱を起こす波浪成分波(ブラッグライン)で近似できることによる. このような小さい波浪成分波は波浪スペクトルの平衡領域に存在するため, ブラッグライン付近ではこれらの波はほとんど一定とみなすことができ, 積分の外に出せる.

その結果, 式(1)は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することができ, Barrickは平均波高 H_{AVE} と平均周期 T_{AVE} を算出する以下の式を提案した.

$$H^2_{AVE} = \frac{2 \int_{-\infty}^{+\infty} [\sigma^{(2)}(\omega) / w(\omega / \omega_b)] d\omega}{k_0^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma^{(1)}(\omega) d\omega} \dots\dots\dots (5)$$

$$T_{AVE} = \frac{2\pi \int_{0.1}^{1.+\infty} \sigma^{(2)}(\omega_b \nu) / w(\nu) d\nu}{\omega_b \int_{0.1}^{1.+\infty} [(\nu - 1) \sigma^{(2)}(\omega_b \nu) / w(\nu)] d\nu} \dots\dots\dots (6)$$

$$w(\nu) = \frac{8|\Gamma|^2}{k_0} \dots\dots\dots (7)$$

ここに, ν は規格化した周波数 ($=\omega/\omega_b$), $w(\nu)$ はカップリング係数から求められる重み関数である.

上記の平均波の波高と周期を用いて, 有義波高 ($H_{1/3}$) と有義波周期 ($T_{1/3}$) は以下に示す経験式を用いて求められる.

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= 1.6 H_{AVE} \dots\dots\dots (8) \\ T_{1/3} &= 1.2 T_{AVE} \end{aligned}$$

3. 橋本・徳田 (1998) によるベイズ法

橋本・徳田 (1998) は, 式(2)の非線形積分方程式から直接, 方向スペクトルを推定するベイズモデルを開発した.

橋本・徳田は, 方向スペクトル $S(f, \theta)$ は一般に $S(f, \theta) \geq 0$ であるが, $S(f, \theta) > 0$ と仮定することにより, 方向スペクトル $S(f, \theta)$ を指数部に離散の一定関数を有する指数関数を用いて以下のように表現した (式(9)).

$$S(f, \theta) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \exp(x_{i,j}) \delta_{i,j}(f, \theta) \dots\dots\dots (9)$$

ここに, $x_{i,j} = \ln S(f_i, \theta_j)$, M は周波数分割数, N は方向分割数で, $\delta_{i,j}(f, \theta)$ はデルタ関数で以下のような関係を満たす.

$$\delta_{i,j}(f, \theta) = \begin{cases} 1: f_{i-1} \leq f < f_i \text{ and } \theta_{j-1} \leq \theta < \theta_j \dots\dots\dots (10) \\ 0: \text{その他} \end{cases}$$

また橋本・徳田は, 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ている. さらに式(2)の基礎式を満たす程度(観測値と推定値の一致度)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した.

本研究では, 橋本・徳田 (1998) と同様, 重み係数として適当なパラメータ u^2 (超パラメータ)を用い, u を式(11)で示す格子探索法による繰り返し計算により種々に変えて, 最小のABIC探索を行った.

$$u = ab^m (a = 0.027, b = 0.3, m = 0, 1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots (11)$$

4. 五島列島での短波海洋レーダ観測

本研究では五島列島西岸沖で観測された短波海洋レーダデータを使用した. この海洋レーダは, 海上漂流ゴミの収束域予測を行うこと目的として, 高崎鼻と津和崎(図-1および写真-1)に2007年11月に設置され, 2010年2

図-1 短波海洋レーダの観測対象海域

写真-1 短波海洋レーダアンテナ(左:高崎鼻局, 右:津和崎局)

表-1 短波海洋レーダの緒元

	項目
レーダの形式	送受切り替えFMCW
周波数	24.515MHz
掃引周波数幅	100kHz
周波数掃引間隔	0.5s
送信出力	200W
距離分解能	1.5km
アンテナ	デジタルビームフォーミング方式
ビーム幅	約13度
観測範囲	±45度, 7.5度ステップ

月まで観測が行われた。設置されたのは、国土技術政策総合研究所が所有する長野日本無線製の送受切り替えFMCW方式、周波数24.5MHzの海洋レーダである(表-1)。五島列島では1時間に1回、10分間の観測を行い、ドップラスペクトルデータを取得した。本研究では、この観測データのうち、2007年12月10日～2008年1月12日の冬季に観測されたものを解析した。また海洋レーダによる波高、周期、および方向スペクトルは、高崎鼻と津和崎の両局から約30kmの位置に設定したモニタリング地点(図-1に●で示した)で推定を行い、後述する第三世代波浪推算法WAMによる推定結果と比較した。

図-2 観測期間中の風(上段)、波高・周期(下段)

解析期間中の五島列島沿岸での風況および波浪を図-2に示す。風は、アメダス小値賀地点(図-1の▲)、波浪は気象庁の超音波式波高計(図-1の◎)によるものである。

五島列島沿岸では、解析期間を通じて北寄りの風が卓越しており、有義波高が3mを越えた12/30～1/1にかけては、北西風が連吹した。

短波海洋レーダの観測範囲には、波高計が設置されていない。そのため本研究では、現地観測データのかわりに、高精度で沿岸波浪が推定できる第三世代波浪推算法WAM(例えばKomenら, 1994)により観測期間の波浪場を推算し、海洋レーダによる推定値と比較することとした。

WAMでの波浪推算に用いた風は、気象庁GPVデータのメソ客観解析値(MSMデータ)である。MSMデータは北緯28～40度、東経120～134度の範囲(113×97格子)を0.125度間隔で内挿し、3時間毎のデータセットを作成した。また解析領域は、広領域(北緯28～40度、東経120～134度、格子間隔0.125度)、中領域(北緯32～34度、東経126.5～130度、格子間隔0.03125度)、五島列島沿岸領域(北緯32.5～33.5度、東経128～129.25度、格子間隔0.015625度)の3領域に分け、1wayネスティングにより段階的に空間解像度を上げて波浪場を計算した。

5. 方向スペクトルの推定精度向上に関する検討

(1) ドップラスペクトルの観測例

図-3は、五島列島の短波海洋レーダ(周波数24.5MHz)による図-1のモニタリング地点(●)のドップラスペクトルの一例で、津和崎局と高崎鼻局のそれぞれで観測されたドップラスペクトルを示している。ここに縦軸は対数で表わしたスペクトルパワー(単位: dB)、横軸は規格化されたドップラ周波数を示す。この例では2局で観測されたドップラスペクトルは、同時刻に同一地点で得られたものであるが、両者のエネルギーレベルは大きく異なっていることがわかる。

図-3 モニタリング地点のドップラスペクトル

(2) 1次散乱と2次散乱の分離

ドップラスペクトルの2次散乱成分は、共鳴条件を満たす無数の周波数・方向成分波浪の組み合わせからの寄与を表している。適切に1次散乱成分を除去し、2次散乱成分を抽出することができれば、波高、周期および波向の推定精度向上につながる。

本研究では、1次散乱成分の周辺で、5項から成るV字部分（中央値が極小）を検出し、この中央値部分を1次散乱と2次散乱の境界と判定することにより、1次散乱を取り除いた。

(3) バリック法による波浪推定

観測されたドップラスペクトルから、前項(2)の方法で取り出した2次散乱を用いて、バリック法によりモニタリング地点の波浪諸元を推定した。図-4に2007年12月10日～2008年1月12日のモニタリング地点での有義波高、有義波周期の経時変化を示す。その結果、有義波高は波高が3mを超える12月30日から1月4日にかけて、津和崎局、高崎鼻局の差異が大きくなるとともに、WAMによる計算結果ともずれが大きかった。

(4) ドップラスペクトルのエネルギー補正

本来、同じモニタリング地点で推定された波高 (H_{AVE}) は、津和崎局、高崎鼻局で同じ値とならなければならない

いたため、前項(3)のバリック法による推定結果の違いは、観測されたドップラスペクトルデータのエネルギーレベルの違いによるものと考えた。今まで観測結果を得た後に、エネルギーレベルの違いを追及することや、エネルギーレベルの補正は行われてこなかった。

そこで、本研究ではバリック法で求めた高崎鼻局と津和崎局の波高が同じになるように、エネルギーレベルの大きい局に合わせて、エネルギーレベルの小さいドップラスペクトルに定値を乗じることにより、エネルギーレベルを調整した。すなわちこの調整を行った後、ドップラスペクトルデータからバリック法により波高・周期を計算すれば、津和崎局と高崎鼻局の波高・周期はほぼ一致する。

ベイズ法では、ある1地点の波高・周期を計算するのに2局のドップラスペクトルデータを必要とする。ベイズ法の入力データセットは、バリック法でエネルギーレベル調整を行った後の2局のドップラスペクトルデータとした。

(5) ベイズ法による方向スペクトル推定

前項(4)により、高崎鼻局と津和崎局でのドップラスペクトルエネルギーレベルの補正後、ベイズ法による方向スペクトルの推定を行った。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一定値関数を仮定しており、周波数分割数 M 、方向分割数 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。

そこで、本研究では $M=N=8$ として、方向角に関しては $0 \sim 360$ 度 ($0 \sim 2\pi$) の範囲を等分割し、周波数は $0.05 \sim 1.0$ Hzを等比率で8分割した。

ベイズ法により有義波高、有義波周期を推定した結果を図-5に示す。推定結果はWAMによるものとほぼ一致した。また方向スペクトルを推定した結果、WAM、ベイズ法とも北西方向の 0.1 Hz付近に単峰のエネルギーピークがみられ、エネルギー分布形状も比較的良く一致した。

図-4 モニタリング地点でのバリック法とWAMの有義波高・有義波周期の比較

図-5 モニタリング地点でのベイズ法とWAMの有義波高, 有義波周期, および方向スペクトルの比較

6. おわりに

短波海洋レーダにより五島列島西岸沖で得られたドップラスペクトルデータを用いて, 波浪推定精度の向上を行った. まず従来法であるパリック法による波高推定値のずれに着目し, 2局のドップラスペクトルエネルギーが同じくなるようにキャリブレーションを行った.

この補正データをベイズ法に入力した結果, WAMの推定値と良く一致した波高, 周期および方向スペクトルの推定値を得ることができた. 今後, 短波海洋レーダを用いた現地観測を実施し, 本研究結果の適用性を検証するとともに, 実用化に向け, さらなる推定精度の向上を図る予定である.

なお, 本研究で使用した五島列島の短波海洋レーダ観測データは, 環境省の(旧)地球環境研究総合推進費(D-071, 平成19-21年)の援助により取得されたものである.

参 考 文 献

- 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.

- 橋本典明・Lukijanto・山城 賢 (2008): 海洋短波レーダにおける実用的な方向スペクトル推定法の開発, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1451-1455.
 橋本典明・Lukijanto・山城 賢 (2010): 海洋短波レーダにおける方向スペクトル推定法の現地観測データへの適用性に関する検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.66, pp.1411-1415.
 日向博文・諸星一信・金津伸好 (2008): HFレーダーによる漂着ゴミ回収効率化の試み, 沿岸海洋研究, 第45号, pp.51-60.
 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.
 Hisaki, Y (1996): Nonlinear inversion of the integral equation to estimate ocean wave spectra from HF radar, Radio Science, Vol. 31, No.1, pp. 25-39.
 Komen, G.J., L.Cavalieri, M.Donelan, K.Hasselmann, S.Hasselmann and P.A.E.M. Janssen(1994): Dynamics and Modelling of Ocean Waves, Cambridge University Press, 532 p.
 Wyatt, L. R. (1990): A relaxation method for integral inversion applied to HF radar measurement of the ocean wave directional spectral, Int. Jour. Remote Sensing, Vol.11, pp.1481-1494.
 Wyatt, L. R. (1997): The Ocean wave directional spectrum, Oceanography, Vol.10, No.2, pp.85-89.