

VHF 沿岸海洋レーダによる波浪観測

徳田 正幸* ・ 橋本 典明** ・ 永井 紀彦***
永松 宏**** ・ 鈴木 覚*****

1. はじめに

徳田ら (1997) の論文によって, 狭い国内事情に適した VHF 短波海洋レーダの開発と, それによる流れ観測を係留系ベルゲン流速計と同時にを行い, 次のことを明らかにした。

- ① HF レーダと比較して, アンテナの小型化と観測可能な最短距離範囲の改善と空間分解能の向上が計れた。
- ② 表層流観測に関して, VHF レーダは実用的な精度を有すること。

本論文の目的は, 上記の VHF レーダが波浪観測についても実用的な精度で観測できるかどうかを明らかにすることである。流れ観測は上記の論文により, 第 1 次オーダーのドップラスペクトル特性のみで解析できるが, 波浪観測は, 第 2 次オーダーのスペクトル特性の解析に基づく。これを行うためには, 高い S/N の観測法と精度の高い波浪情報抽出のアルゴリズムが必要となる。実証観測は, 冬季の日本海沿岸域の波浪について, レーダ観測と波高計観測を同時に行い, 波浪の観測精度を明らかにするものである。本論文で議論する波浪特性は, 第 1 段階として, 波向を除く, 波高と周期に関するものとした。

2. 観測の概要

2.1 レーダ観測

図-1 において, レーダ局として A 局と B 局, アンテナビームと照合観測の波高計の観測点 A および今回レーダで観測された流れベクトル図の 1 例を示した。観測は 1997 年 12 月 5 日～1998 年 3 月 17 日で行った。本論文で議論する期間は, 風が強い期間である, 2 月 7 日～同月 17 日の約 10 日間とした。

前節で述べた, 高い S/N の観測をするために, 波浪観測は流れ観測と比べて, 観測時間を 2 倍にした。1 ビー

ム当たり約 10 分間とし, 図-1 及び表-1 で示したように, ビーム本数を 11 本とした。その結果, 観測周期は 2 時間となり, 各観測点は 2 時間毎に観測データを得ることになる。アンテナビームにおいて, A 局のビーム A1 と A2 そして B 局のビーム B11 は, アンテナ電力パターンの半値幅土 10 度により, レーダの送受信波が陸地の影響を受けることになる。図-2 は A 局の各ビームにおける, レンジ方向のエコーの全エネルギー分布を示した。この図から, 上記のビームは陸地の影響を受け, レンジ

表-1 観測ビームの方位

観 測 時 間	ビーム No.	A局のビーム角	B局のビーム角	
偶数時	10分	1	47°	339°
	20分	2	42°	331°
	30分	3	37°	323°
	40分	4	29°	315°
	50分	5	21°	307°
奇数時	00分	6	23°	229°
	10分	7	5°	291°
	20分	8	357°	283°
	30分	9	349°	275°
	40分	10	341°	267°
	50分	11	333°	259°

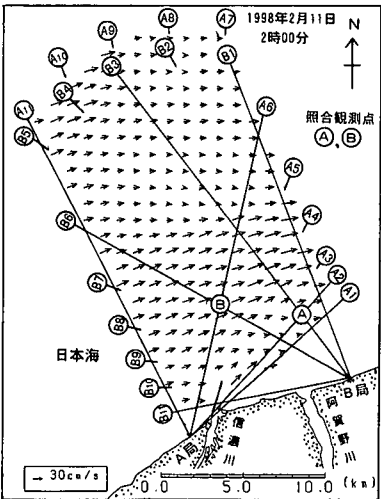


図-1 レーダ局と照合観測点と観測された流れベクトル図

* 正会員 理博 国際航業株式会社技術センター徳田研究室長
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部水理研究室長
*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部海象調査研究室長
**** 国際航業株式会社日野技術所
***** 正会員 国際航業株式会社本社総合企画室

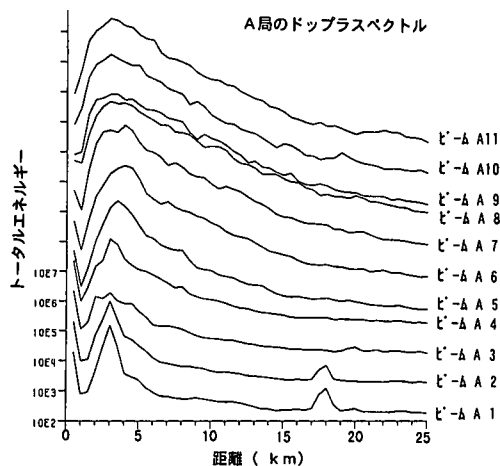


図-2 各ビームの全エネルギー分布

方向にエネルギーの減衰が他のビームに比べて、激しいことが分かる。よって、これら3つのビームは流れ観測には使用できるが、波浪観測には使用できないと言える。このことにより、照合波浪観測点A点のレーダの観測データはB局のみとなる。

2.2 照合観測

波浪情報の照合観測は、2時間毎の正時に行われている。運輸省第一港湾建設局による新潟沖波浪観測を採用した。観測点は図-1のA点である。使用する照合観測データは波高、周期そして周波数スペクトルである。

照合観測点は上記のA点とB点とした(図-1)。A点は波高計設置点であるとともに、レーダ観測のビームB3のレンジ距離5.0 kmの点となる。

B点はモデル計算との照合を行う点で、ビームA6とB6の交点とした。モデル計算に入力される波浪情報は、A点の波高計観測値を用いることにした。

レーダ観測において、各ビーム上で500 m毎にドップラスペクトルが得られる。よって、照合観測点のレーダのデータはこれらの点にもっとも近いビーム上の観測点のものとなる。

3. 解析法

Barrick (1972) は短波海洋レーダで観測されるドップラスペクトル $\sigma(\omega)$ と波浪の方向スペクトル $S(\kappa)$ の関係基本式を積分方程式で示した。これらの式は徳田ら (1992) の式 (1) と (3) であり、今後これらは Barrick の式と呼ぶことにする。式 (1) は第1次オーダーの散乱式で、共鳴した波浪成分波だけのスペクトルエネルギーが直接的に得られる。式 (3) は第2次オーダーの散乱式で、波浪成分波の振幅とレーダ波の波長の比をパラメータとする摂動法で導出された。その結果ドップラ

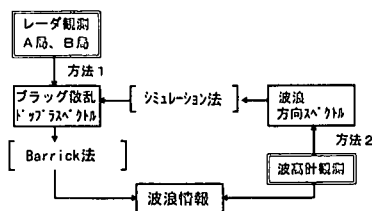


図-3 波浪情報抽出の流れ図

スペクトルは結合関数と $S(\kappa) * S(\kappa)$ の積分式で表され、方向スペクトルを得るためには、非線形の逆問題を解かねばならない。最近、Atanga and Wyatt (1997) は、緩和法による逐次非線形逆問題解法によって、比較的精度良く解けることを示した。しかしこの方法は実用的に外部ノイズに弱く、収斂性に問題があると思われる。よって、本論文では、徳田ら (1993) が HF レーダに使用した Barrick 法 (Barrick (1977 a, b)) を採用した。この方法により、波浪情報を抽出するとともに、精度と問題点を図-3 の処理図に従って明らかにする。

3.1 ドップラスペクトルのシミュレーション

Barrick の式を用いて、波浪の方向スペクトルから海面散乱のドップラスペクトルを順問題的に求める。具体的には Lipa and Barrick (1982) の方法を使用した。かれらは Barrick の式の2重積分をブラッグ共鳴条件から方位 θ のみの積分に変形し、効率よい数値計算法を開発した。この方法は図-3の方法2で使用する。入力する波浪方向スペクトルは2種類とした。すなわち、ここで Pierson-Moskowitz 周波数スペクトル、Bretschneider 周波数スペクトル及び光易型方向分布関数を、それぞれ PMS, BS 及び MD とすると、モデル1: PMS・MD, モデル2: BS・MD である。PMS は風速で、BS と MD は有義波特性で決まる分布で、波向は風向とした。これらの入力する現場のデータは、照合観測点A点の波高計と近くの気象台の風である。

3.2 Barrick の波浪情報アルゴリズム

この方法はすでに述べた非線形の積分方程式の逆問題の解法において、ドップラスペクトルの第1次オーダー散乱 $\sigma^{(1)}$ のピーク周波数付近で第2次オーダーの散乱 $\sigma^{(2)}$ が卓越することに着目し、共鳴する波浪成分波は方位に依存せず、かつそのうちの1組の波浪成分波を第1次オーダー散乱波と共鳴する波と近似した。この仮定により、上記の積分式は線形化され、平均波の波高と周期は直接的に、徳田ら (1992) の式 (5) と (6) でそれぞれ与えられる。これらの式から、周波数スペクトル ϕ は次式で表すことが出来る。これらの式の記号は徳田ら (1992) と同じである。 $f, \kappa, W(\nu)$ はそれぞれ波浪の周波

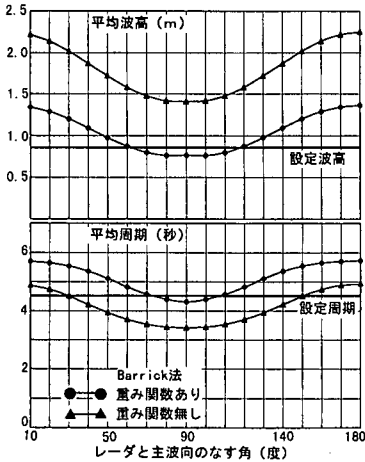


図-4 Barrick 法で得られた平均波の方位特性

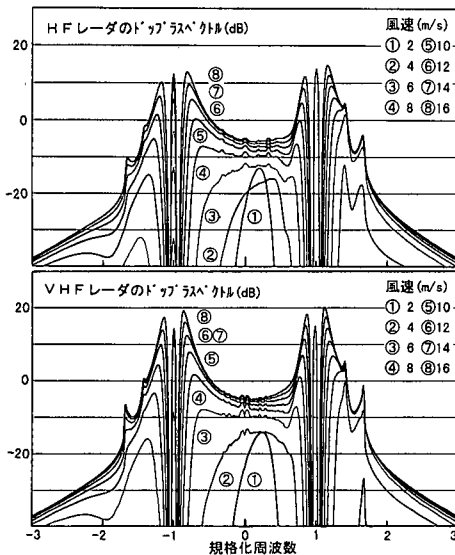


図-5 モデル1に対して、VHFレーダとHFレーダのドップラスペクトル

数レーダ波の波数、重み関数である。

$$\phi(f) = \frac{4\sigma^{(2)}(\omega)/W(\nu)}{\kappa^2 \int_0^\infty \sigma^{(1)}(\omega) d\omega} \dots\dots\dots (1)$$

$$f = |\omega - \omega_D|/2\pi, \quad \nu = \omega/\omega_D$$

ω はドップラ周波数で、 ω_D はブラック共鳴周波数である。これらの式から分かるように、Barrick 法は外部ノイズに比較的強く、解析も比較的容易な方法である。上式から、1つのドップラスペクトルは2つの第1次オーダーの散乱を有するので、4つの周波数スペクトルが得られる。安定したスペクトルを常に得るために、次のような解析方法を採用した。①2つの第1次オーダー散乱

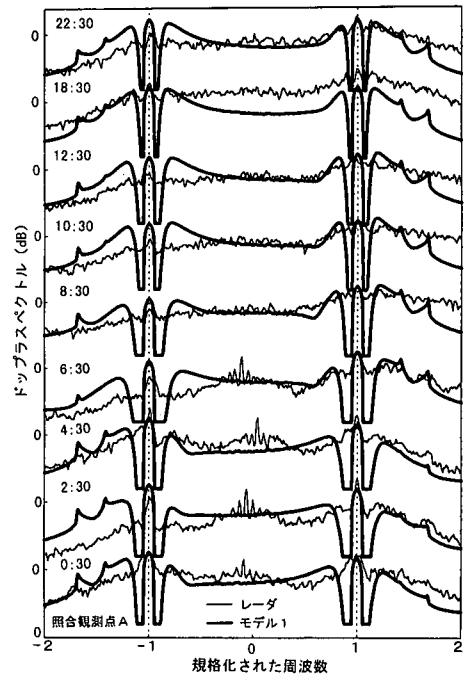


図-6 ドップラスペクトルに関して、観測値とモデル2の比較

のうち大きい方の周波数領域を選ぶ。②2つのスペクトルから平均的なスペクトルを求める。

Barrick 法の誤差は、前節のシミュレーション法によって具体的に調べることができる。図-4の結果は波浪方向スペクトルとしてモデル1を入力し、ドップラスペクトルを求め、Barrickの方法を適用して平均波の特性を抽出したものである。この図から分かるように、Barrick 法の有効性は重み関数によって示された。しかし、この方法の方位依存性は実用的な精度から無視できないと言える。よって、出来るだけ観測精度を高めるために、本論文では Barrick 法で得られたA局とB局の観測値の平均値を用いる方法（今後平均 Barrick 法と呼ぶ）を採用することにした。

4. 解析結果

4.1 ドップラスペクトルの特性

議論するドップラスペクトルは、第3.1節の2種類のモデルによるシミュレーションされたものと、レーダ観測されたものとなる。はじめに、前者の結果を用いて、VHFレーダとHFレーダの相違を調べる。レーダ周波数はそれぞれ41.9 MHzと24.5 MHzとした。

図-5は、モデル1に対してVHFレーダとHFレーダのドップラスペクトルを示した。この図から、VHFレーダはHFレーダに比べて、第2次散乱は第1次散乱に比べて相対的に大きくなることで、感度が良くなる長

所はあるが、第1次散乱で規格するアルゴリズムでは短所となる。その理由は高波浪時に第1次散乱と第2次散乱の区別が困難となるからである。よって、VHFレーダではHFレーダに比べ高波浪の観測がより困難であることが予想される。

図-6は照合観測点Aで、2月9日で観測された観測値と方法2（モデル2）の結果の比較を示したものである。この図より、両者の相違はとくにマイナス周波数領域に見られる。この原因は波向として使用した風向が適切でなかったことが推測される。

4.2 周波数スペクトル

Barrick法を図-6の観測されたドップラスペクトルに適用すると、すでに述べたように波浪の周波数スペクトルが抽出される。その結果を波高計の観測値と比較すると、図-7が得られる。この図から、スペクトルの形状と大きさにおいて、Barrick法は必ずしも観測値との一致性は非常に良いとは言えないことである。これは主に

Barrick法での波浪の方位特性の無視の仮定に原因がある。

4.3 波高と周期

Barrick法で得られた周波数スペクトル ϕ をもとに、 n 次のモーメント M_n を定義する。平均波の波高 H と周期 T および有義波高 $H_{1/3}$ と周期 $T_{1/3}$ は下式で与えられる。

$$M_n = \int_0^{\infty} f^n \phi(f) df \quad (2)$$

$$\bar{H} = \sqrt{2\pi M_0}, \quad \bar{T} = \sqrt{M_0/M_2} \quad (3)$$

$$H_{1/3} = 1.6\bar{H}, \quad T_{1/3} = 1.2\bar{T} \quad (4)$$

a) 照合観測点Aのレーダの波高と周期の特性

照合結果の時系列比較は図-8に示した。すでに述べたように、ここでのレーダ観測はB局のみで、平均Barrick法は使用できない。この図より、次のことが言える。

- ① 波高と周期は、観測値が大きくなると、バラツキも大きくなること。
- ② 平均波高2m以下において、VHFレーダはほぼ正常に観測できる。
- ③ 周期観測は波高観測に比べて、精度的に少し低い傾向がある。

表-2 レーダ波浪観測精度

	相関係数	比例係数	波高の誤差
平均波高	0.894	0.901	±13 cm
有義波高	0.897	0.867	±20 cm
平均波周期	0.572	0.836	±0.82 秒
有義波周期	0.592	0.886	±0.98 秒

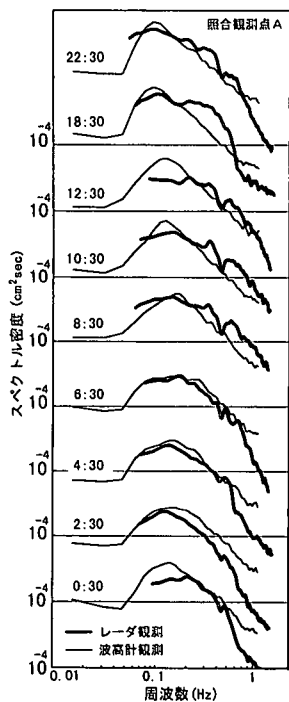


図-7 A点の周波数スペクトルに関して、レーダと波高計の比較

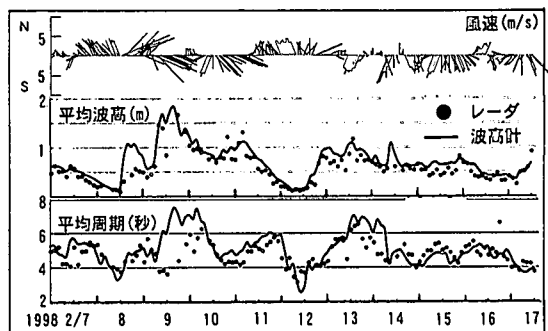


図-8 A点の平均波高と平均周期に関して、レーダと波高計の時系列比較

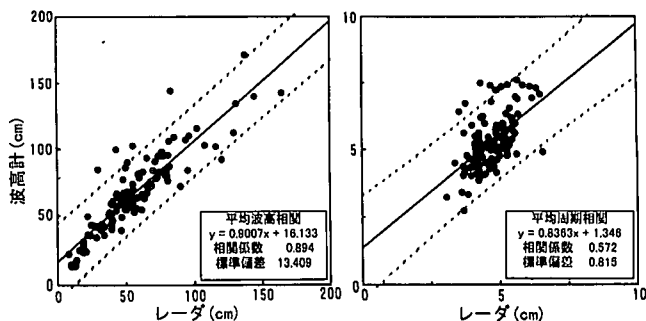


図-9 A点の波高と周期に関して、レーダと波高計の相関比較

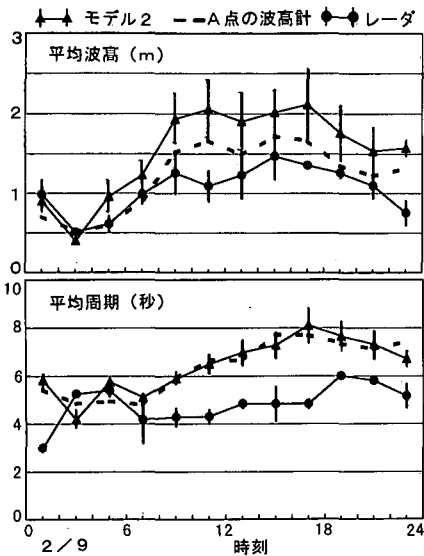


図-10 B点の平均波特性に関して、レーダとモデルの比較

照合結果の相関比較は図-9に示した。これから、1つの局の観測精度は表-2にまとめられる。これらの結果から、次のことが言える。

- ① 波高は周期に比べて、高い相関係数と1に近い比例定数で、実用的な観測精度を有する。
- ② 周期は観測精度から不十分である。1局の観測の場合はアルゴリズムを検討する必要がある。

b) 照合観測点Bのレーダの波高と周期の特性

平均 Barrick 法の有効性を明らかにするため、必要なデータは2局で観測されたドップラスペクトルである。照合データとして、モデル2によるシミュレーションで得られるドップラスペクトルデータを用いる。これらのデータを平均 Barrick 法で解析すると、図-10を得る。この図において、A局とB局の値は平均値を通る縦線分の両端で表した。第2.2節で述べたように、モデルに入力した波浪情報は、B点で観測されたものでないために、この図からは厳密な議論はできないが、次のようなことが言える。

- ① 平均 Barrick 法はより安定な精度の結果をもたらす。
- ② モデル計算においては、波高よりも周期の方が再現性がよいが、観測値の一致性は逆に波高の方が良い。

5. ま と め

VHF レーダは HF レーダに比べ、観測領域は狭いが、

小さいアンテナで高いレンジ方向の分解能と強い散乱エコーが期待できる。表層流観測において、VHF レーダは実用的な精度が徳田ら (1993) によって実証された。波浪観測は2次オーダーの散乱特性の観測になるために、(波浪の波高/レーダ波の波長) が十分に小さいことが必要条件となる。このことは、高波浪になると、ドップラスペクトルにおいて第1次散乱と第2次散乱の区別が困難となることと一致し、VHF レーダは HF レーダに比べて、観測できる最大波高が小さいことになる。このようなことから、VHF レーダによる波浪観測の研究は、HF レーダに比べ、ほとんど行われていないと思われる。本論文において、荒天時に VHF レーダの観測し、観測精度の検討を行い、次のような結論を得た。

波浪抽出アルゴリズムとして Barrick 法を用いた。この方法は波向情報は抽出できないが、1局のみに対して表-2の観測精度を得た。2局のデータによる平均 Barrick 法を用いればさらに観測精度の信頼性の向上がはかれる。また、観測可能な最大波高について、今回の観測状況および今までの実績から、有義波波高で約4mまで可能と思われる。

謝辞: 本研究の観測に関して御協力頂いた運輸省第一港湾建設局の方々に、またレーダ観測時のレーダの調整に協力して下さった長野日本無線株式会社の方々に、ここに合わせて深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 徳田正幸・大野裕一・久木幸治 (1992): 短波海洋レーダによる流れと波浪の計測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 186-190.
- 徳田正幸・村上和男・渥美泰彦・永松 宏 (1997): VHF 沿岸海洋レーダの開発と流れ観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1276-1280.
- Atanga, J. N. and L. R. Wyatt (1997): Comparison of Inversion Algorithms for HF Radar Wave Measurements, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 593-603.
- 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. (1977a): Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra, Radio Science, Vol. 12, No. 3, pp. 415-424.
- Barrick, D. E. (1977b): The ocean waveheight nondirectional spectrum from inversion of the HF sea-echo doppler spectrum, Remote Sensing of Environment, 6, pp. 201-227.
- 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.