

VHF 沿岸海洋レーダの開発と流れ観測

徳田正幸*・村上和男**・渥美泰彦***・永松 宏****

1. はじめに

最近の日本海での油流出事故でも分かるように、沿岸域の面的な海象観測の確立が必要となる。よって、海象情報を面的に効率よく観測できる測器の開発が必要である。このような意味において、短波海洋レーダは画期的な観測測器と言える(徳田ら, 1992, 1993)。しかしながら、従来の HF レーダは、大きなアンテナ(長さ 60 m)を必要とし、海岸付近の海域の観測が困難で、かつ空間分解能が十分でない欠点をもつ。このために、日本の海岸のレーダ設置条件と海象条件に適した、沿岸用海洋レーダの開発を行った。開発目標は次の点とした。

- (1) アンテナの小型化
- (2) 最小観測距離と分解能の向上

本研究において、VHF レーダの制作を行い、第 1 段階として流れ観測装置の開発を行った。よって、本論文において、第 1 に開発された VHF レーダの特性を明らかにする。第 2 にこのレーダによる流れ観測精度とその観測装置の有用性を明らかにする。

2. 開発内容

2.1 最適レーダ周波数と分解能

本レーダ(VHF)は HF レーダと同様に、ブラッグ共鳴散乱に基づく Barrick(1977)の理論で海象情報を観測するものである。すなわち、レーダ波(周波数約 41.9 MHz、波長約 7.16 m)を波浪成分波(周波数 0.66 Hz、波長約 3.5 m、以後第 1 次波浪成分波と呼ぶ)にブラッグ共鳴させ、海の流れと波浪情報を観測するものである。共鳴条件は入射角をゼロとすると、次式となる。

レーダ波の波長=2×海の波の波長 ……………(1)

共鳴条件式(1)と波浪のスペクトル特性から、短波帯では、特別に最適な周波数は存在しないことである。よって、開発目標(1)を達成するために、出来るだけ高周波を選択することにした。その理由は次式のアンテナ

の長さ D とレーダ波長 λ の、よく知られた関係による。

アジマス方向の分解能 $\Delta\theta \propto \lambda/D$ ……………(2)

$\Delta\theta$ はアンテナのビームの半値幅(ビームのピーク値の 3 dB 落ちのビームの広がり角)で、アンテナ方位に対して直角方向(以後アジマス方向と呼ぶ)の空間分解能である。式(2)より、分解能を一定とすると、VHF レーダを採用することによって、HF レーダに比べて、少なくとも 1/1.7 のアンテナの小型化が可能となった。

次に分解能について議論する。レーダ観測の場合、エコーの位置決めはアンテナ方位(アジマス方向)とアンテナからの距離(レンジ方向)で決まる。よって、分解能はこれらの方向で定義される。前者の分解能はすでに述べた。ここではレンジ方向の分解能について議論する。これはレーダ理論によれば、次式で与えられる。

レンジ方向の分解能 $\delta = C/(2B)$ ……………(3)

C と B はそれぞれ光速 (3×10^8 m) と占有周波数帯域幅(本レーダ実験局では掃引周波数幅 300 kHz が対応する)、 $\delta = 500$ m となる。よって、レンジ方向の分解能は HF レーダに比べて 3 倍向上させることができた。

以上のことにより、本システムの特性は HF レーダ(井口等, 1989)と比較して、表-1 にまとめられる。

2.2 信号処理

本レーダ方式は FMICW 方式(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave Method)である。

表-1 VHF レーダ(本システム)と HF レーダの性能比較

No.	項目	VHF レーダ諸元	HF レーダ諸元
1	周波数	41.900 MHz	24.515 MHz
2	周波数掃引幅	300 kHz	100 kHz
3	レーダ形式	送受切り替え FMCW	送受切り替え FMCW
4	送信出力	50 W (ピーク値)	100 W (ピーク値)
5	パルス幅	224 μ S	468 μ S
6	パルス繰り返し周波数	2,047 Hz	1,024 Hz
7	掃引速度	1,200 kHz/s	200 kHz/s
8	形式	送受共用 5 極 4 セットの八本アンテナで機械回転式	送受共用 反射付き短波ホイップ 10 素子フェーズドアレイ
9	偏波	垂直偏波	垂直偏波
	ビーム幅	20 度(水平方向)	15 度(水平方向)
	ビームスキャン	360 度の範囲で自由に設定	± 45 度/7.5 度ステップ
	寸法	約 14.4 m(長さ)×6 m(高さ)	約 66 m(長さ)×6 m(高さ)
	距離分解能	500 m	1500 m
10	観測性能	観測可能範囲	約 0.5~20 km
		ドップラ周波数分解能	1/128 Hz (128 秒観測時間)
		速度分解能	約 1.5~50 km
			1/128 Hz (128 秒観測時間)
			2.89 cm/s
			4.78 cm/s

* 正会員 理博 国際航業株式会社技術研究センター
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所特別研究官
*** 長野日本無線株式会社
**** 国際航業株式会社日野技術所

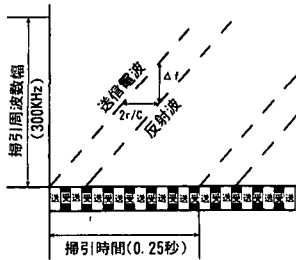
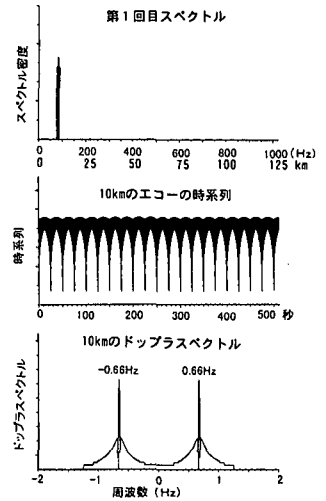
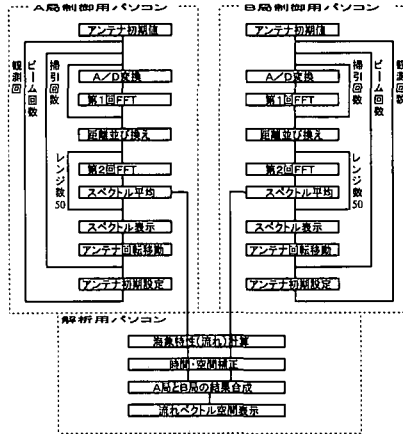


図-1 (上図) 送信波と反射波の周波数の関係

図-2 (中図) データ処理フロー

図-3 (右図) モデル実験によるドップラスペクトル



この方式は図-1で示すように、レーダの周波数を1掃引時間($T_m=0.25$ 秒)毎に41.9 MHzを中心に掃引周波数幅($B=300$ kHz)を時間に対して線形的に周波数変調させる方式である。この方式によると、エコーの共鳴散乱したレンジ距離 R は、受信したときのエコーの周波数とその時の発信周波数の差 Δf から、次式によって与えられる。

$$R = \frac{T_m C}{2B} \Delta f = 0.125 \Delta f \quad \dots\dots\dots (4)$$

以上のレーダ方式を踏まえて、本レーダの信号処理フローは図-2となる。主要な処理は、(1)A/D変換、(2)第1回目のFFT解析、(3)距離毎の並び替え、(4)第2回目のFFT解析で、下式で示すモデルエコーに適用すると、図-3の結果を得た。この結果から、これらの処理法を具体的に議論する。

$$Y(t) = A \sin[2\pi(80 + 0.66)t] + B \sin[2\pi(80 - 0.06)t] \quad \dots\dots\dots (5)$$

1掃引毎にA/D変換(2048 Hzの周波数で16ビット)を行い、512個のデータを得る。これについて第1回目のFFT解析を行い、スペクトルを得る。これにより、1掃引時間内で、レンジ方向の距離に対してのエコーの強度の情報が得られる(図-3の上図)。エコーのスペクトルピーク周波数(Δf)が80 Hzであるから、式(4)よりエコーの位置が10 kmであることがわかる。この処理を掃引回数だけ行う。

次に距離毎の並び替えを行う。これは、上記のスペクトル分布から、同じ距離のエコーのスペクトル値を集め、その結果0.25秒毎のエコーの強さの時系列が得られることになる(図-3の中図)。すなわち、掃引時間はドップラスペクトルの時系列のサンプリング間隔となる。

第2回目のFFT解析を上記の時系列に行うと、最終的なドップラスペクトル(成分個数512個)が得られる(図-3の下図)。このスペクトルから、ピーク周波数±0.66 Hzの情報を得ることが出来る。この周波数は後述

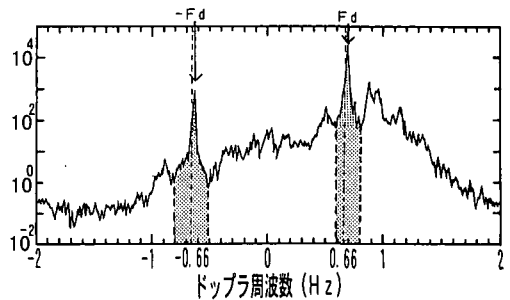


図-4 ドップラスペクトルの特徴

する式(6)より、流れゼロの流れ情報となる。よって、2回のFFT解析と並び替えの解析を行うことによって、エコーのレンジ距離と流れ情報を合理的に取り出すことができた。

掃引時間(サンプリング間隔)に関して、HFレーダは0.5秒(ナイキスト周波数 $F_N=1.0$ Hz)に対して、本研究では0.25秒($F_N=2.0$ Hz)とした。この根拠はVHFレーダの方がHFレーダに比べて、より高周波のエコーを観測するためである。すなわち、第1次散乱ピーク周波数に関して、HFレーダでは0.5 Hzに対して、本レーダでは0.66 Hzと高周波になるためである。

3. 流れのアルゴリズム

3.1 ドップラスペクトルの特性

流れの標準観測は観測したい海域の範囲を5分間毎(実質的なレーダ送受信時間、掃引回数896回×0.25秒=3.7分間)にアンテナを移動させながら観測するものである。受信されるエコーはレーダの空間分解能(レンジ方向0.5 km×アジマス方向のビーム半幅20度)内で、式(1)の共鳴条件を満たす第1次波浪成分波による後方散乱エコーである。受信されるドップラスペクトルは図-4に示すように、第1次散乱ピークは2つある。

これは、2つの第1次波浪成分波が常に海に同時に存在し、それらの波はアンテナ方向に向かう波と、逆に遠ざかる波であるためである。

海の表層流は上記した第1次波浪成分波によるドップラスペクトルピーク周波数 F_d から求めることが出来る。このドップラ周波数は、共鳴した波浪成分の波形の移動速度で決まることになる。もし表層に流れがあれば、その波浪の波形の移動速度は位相速度+表層流の和の速度となる。その波の位相速度は流体理論より約 2.4 m/s となり、それに対応するドップラ周波数は下式から分かるように 0.66 Hz となる。よって、表層流の速度の評価式は

$$\text{流速 (cm/s)} = \frac{\text{光速} \times (F_d \pm 0.66)}{2 \times \text{レーダ周波数 (Hz)}} \quad \text{..... (6)}$$

上式の±は、 $F_d > 0$ に対して-を、 $F_d < 0$ に対して+をとる。 F_d から位相速度分を差し引き、表層流分 ($F_d \pm 0.66$) を得ることになる。注意すべきことは次の3つのことである。

- ①上記の流れはアンテナの視線方向の流れで、正の値はアンテナに向かってくる流れで、負の値は遠ざかる流れとなることである。よって、表層流の流れベクトルを観測するためには、アンテナの方位が異なる、もう1台のレーダによる同時観測を必要とする。今後の議論でこれらのレーダ局をA局とB局と呼ぶことにする。
- ②レーダの観測水深である。すなわち、第1次波浪成分波がどの深さの流れに乗って移動するかである。これについては、Stewart & Joy (1974) によって理論的に研究され、第1次波浪成分の波長/13 が示された。よって、本レーダの観測水深は約 0.3 m と推定される。
- ③ドップラ周波数のプラスとマイナスの領域からそれぞれ流れ情報が得られる。正常なスペクトルであれば、式(6)から同一な流れの値を得る。しかし、実際は外部ノイズが受信される可能性があるため、特にスペクトルピーク値が小さいとノイズに埋もれる危険性がある。このようなことにより、本研究のアルゴリズムは次のようにした。第1次近似として、これら2つのピーク周波数の中で、スペクトル値が高いものとした。この流れ値の妥当性はレンジ方向の流速分布の特性から判定する。もし不適当と判断すると、第2次近似として、もう1つのピーク値を使用する。第2次近似解でも不当であれば、正常な前後のレンジ方向の値から推定することにした。

3.2 流速の時間的・空間的補間法

補間はそれぞれの局で独立に行う。始めに時間補間か

表-2 観測時刻とビーム番号の関係

ビーム	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
観測時刻	00:00	00:05	00:10	00:15	00:20	00:25	00:30	00:35	00:40	00:45	00:50	00:55	01:00	01:05	01:10	01:15	01:20	01:25	01:30	01:35	01:40	01:45	01:50	01:55	02:00	02:05	02:10	02:15	02:20	02:25	02:30	02:35	02:40	02:45	02:50	02:55	03:00	03:05	03:10	03:15	03:20	03:25	03:30	03:35	03:40	03:45	03:50	03:55	04:00	04:05	04:10	04:15	04:20	04:25	04:30	04:35	04:40	04:45	04:50	04:55	05:00	05:05	05:10	05:15	05:20	05:25	05:30	05:35	05:40	05:45	05:50	05:55	06:00	06:05	06:10	06:15	06:20	06:25	06:30	06:35	06:40	06:45	06:50	06:55	07:00	07:05	07:10	07:15	07:20	07:25	07:30	07:35	07:40	07:45	07:50	07:55	08:00	08:05	08:10	08:15	08:20	08:25	08:30	08:35	08:40	08:45	08:50	08:55	09:00	09:05	09:10	09:15	09:20	09:25	09:30	09:35	09:40	09:45	09:50	09:55	10:00	10:05	10:10	10:15	10:20	10:25	10:30	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25	11:30	11:35	11:40	11:45	11:50	11:55	12:00	12:05	12:10	12:15	12:20	12:25	12:30	12:35	12:40	12:45	12:50	12:55	13:00	13:05	13:10	13:15	13:20	13:25	13:30	13:35	13:40	13:45	13:50	13:55	14:00	14:05	14:10	14:15	14:20	14:25	14:30	14:35	14:40	14:45	14:50	14:55	15:00	15:05	15:10	15:15	15:20	15:25	15:30	15:35	15:40	15:45	15:50	15:55	16:00	16:05	16:10	16:15	16:20	16:25	16:30	16:35	16:40	16:45	16:50	16:55	17:00	17:05	17:10	17:15	17:20	17:25	17:30	17:35	17:40	17:45	17:50	17:55	18:00	18:05	18:10	18:15	18:20	18:25	18:30	18:35	18:40	18:45	18:50	18:55	19:00	19:05	19:10	19:15	19:20	19:25	19:30	19:35	19:40	19:45	19:50	19:55	20:00	20:05	20:10	20:15	20:20	20:25	20:30	20:35	20:40	20:45	20:50	20:55	21:00	21:05	21:10	21:15	21:20	21:25	21:30	21:35	21:40	21:45	21:50	21:55	22:00	22:05	22:10	22:15	22:20	22:25	22:30	22:35	22:40	22:45	22:50	22:55	23:00	23:05	23:10	23:15	23:20	23:25	23:30	23:35	23:40	23:45	23:50	23:55	00:00	00:05	00:10	00:15	00:20	00:25	00:30	00:35	00:40	00:45	00:50	00:55	01:00	01:05	01:10	01:15	01:20	01:25	01:30	01:35	01:40	01:45	01:50	01:55	02:00	02:05	02:10	02:15	02:20	02:25	02:30	02:35	02:40	02:45	02:50	02:55	03:00	03:05	03:10	03:15	03:20	03:25	03:30	03:35	03:40	03:45	03:50	03:55	04:00	04:05	04:10	04:15	04:20	04:25	04:30	04:35	04:40	04:45	04:50	04:55	05:00	05:05	05:10	05:15	05:20	05:25	05:30	05:35	05:40	05:45	05:50	05:55	06:00	06:05	06:10	06:15	06:20	06:25	06:30	06:35	06:40	06:45	06:50	06:55	07:00	07:05	07:10	07:15	07:20	07:25	07:30	07:35	07:40	07:45	07:50	07:55	08:00	08:05	08:10	08:15	08:20	08:25	08:30	08:35	08:40	08:45	08:50	08:55	09:00	09:05	09:10	09:15	09:20	09:25	09:30	09:35	09:40	09:45	09:50	09:55	10:00	10:05	10:10	10:15	10:20	10:25	10:30	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25	11:30	11:35	11:40	11:45	11:50	11:55	12:00	12:05	12:10	12:15	12:20	12:25	12:30	12:35	12:40	12:45	12:50	12:55	13:00	13:05	13:10	13:15	13:20	13:25	13:30	13:35	13:40	13:45	13:50	13:55	14:00	14:05	14:10	14:15	14:20	14:25	14:30	14:35	14:40	14:45	14:50	14:55	15:00	15:05	15:10	15:15	15:20	15:25	15:30	15:35	15:40	15:45	15:50	15:55	16:00	16:05	16:10	16:15	16:20	16:25	16:30	16:35	16:40	16:45	16:50	16:55	17:00	17:05	17:10	17:15	17:20	17:25	17:30	17:35	17:40	17:45	17:50	17:55	18:00	18:05	18:10	18:15	18:20	18:25	18:30	18:35	18:40	18:45	18:50	18:55	19:00	19:05	19:10	19:15	19:20	19:25	19:30	19:35	19:40	19:45	19:50	19:55	20:00	20:05	20:10	20:15	20:20	20:25	20:30	20:35	20:40	20:45	20:50	20:55	21:00	21:05	21:10	21:15	21:20	21:25	21:30	21:35	21:40	21:45	21:50	21:55	22:00	22:05	22:10	22:15	22:20	22:25	22:30	22:35	22:40	22:45	22:50	22:55	23:00	23:05	23:10	23:15	23:20	23:25	23:30	23:35	23:40	23:45	23:50	23:55	00:00	00:05	00:10	00:15	00:20	00:25	00:30	00:35	00:40	00:45	00:50	00:55	01:00	01:05	01:10	01:15	01:20	01:25	01:30	01:35	01:40	01:45	01:50	01:55	02:00	02:05	02:10	02:15	02:20	02:25	02:30	02:35	02:40	02:45	02:50	02:55	03:00	03:05	03:10	03:15	03:20	03:25	03:30	03:35	03:40	03:45	03:50	03:55	04:00	04:05	04:10	04:15	04:20	04:25	04:30	04:35	04:40	04:45	04:50	04:55	05:00	05:05	05:10	05:15	05:20	05:25	05:30	05:35	05:40	05:45	05:50	05:55	06:00	06:05	06:10	06:15	06:20	06:25	06:30	06:35	06:40	06:45	06:50	06:55	07:00	07:05	07:10	07:15	07:20	07:25	07:30	07:35	07:40	07:45	07:50	07:55	08:00	08:05	08:10	08:15	08:20	08:25	08:30	08:35	08:40	08:45	08:50	08:55	09:00	09:05	09:10	09:15	09:20	09:25	09:30	09:35	09:40	09:45	09:50	09:55	10:00	10:05	10:10	10:15	10:20	10:25	10:30	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25	11:30	11:35	11:40	11:45	11:50	11:55	12:00	12:05	12:10	12:15	12:20	12:25	12:30	12:35	12:40	12:45	12:50	12:55	13:00	13:05	13:10	13:15	13:20	13:25	13:30	13:35	13:40	13:45	13:50	13:55	14:00	14:05	14:10	14:15	14:20	14:25	14:30	14:35	14:40	14:45	14:50	14:55	15:00	15:05	15:10	15:15	15:20	15:25	15:30	15:35	15:40	15:45	15:50	15:55	16:00	16:05	16:10	16:15	16:20	16:25	16:30	16:35	16:40	16:45	16:50	16:55	17:00	17:05	17:10	17:15	17:20	17:25	17:30	17:35	17:40	17:45	17:50	17:55	18:00	18:05	18:10	18:15	18:20	18:25	18:30	18:35	18:40	18:45	18:50	18:55	19:00	19:05	19:10	19:15	19:20	19:25	19:30	19:35	19:40	19:45	19:50	19:55	20:00	20:05	20:10	20:15	20:20	20:25	20:30	20:35	20:40	20:45	20:50	20:55	21:00	21:05	21:10	21:15	21:20	21:25	21:30	21:35	21:40	21:45	21:50	21:55	22:00	22:05	22:10	22:15	22:20	22:25	22:30	22:35	22:40	22:45	22:50	22:55	23:00	23:05	23:10	23:15	23:20	23:25	23:30	23:35	23:40	23:45	23:50	23:55	00:00	00:05	00:10	00:15	00:20	00:25	00:30	00:35	00:40	00:45	00:50	00:55	01:00	01:05	01:10	01:15	01:20	01:25	01:30	01:35	01:40	01:45	01:50	01:55	02:00	02:05	02:10	02:15	02:20	02:25	02:30	02:35	02:40	02:45	02:50	02:55	03:00	03:05	03:10	03:15	03:20	03:25	03:30	03:35	03:40	03:45	03:50	03:55	04:00	04:05	04:10	04:15	04:20	04:25	04:30	04:35	04:40	04:45	04:50	04:55	05:00	05:05	05:10	05:15	05:20	05:25	05:30	05:35	05:40	05:45	05:50	05:55	06:00	06:05	06:10	06:15	06:20	06:25	06:30	06:35	06:40	06:45	06:50	06:55	07:00	07:05	07:10	07:15	07:20	07:25	07:30	07:35	07:40	07:45	07:50	07:55	08:00	08:05	08:10	08:15	08:20	08:25	08:30	08:35	08:40	08:45	08:50	08:55	09:00	09:05	09:10	09:15	09:20	09:25	09:30	09:35	09:40	09:45	09:50	09:55	10:00	10:05	10:10	10:15	10:20	10:25	10:30	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25	11:30	11:35	11:40	11:45	11:50	11:55	12:00	12:05	12:10	12:15	12:20	12:25	12:30	12:35	12:40	12:45	12:50	12:55	13:00	13:05	13:10	13:15	13:20	13:25	13:30	13:35	13:40	13:45	13:50	13:55	14:00	14:05	14:10	14:15	14:20	14:25	14:30	14:35	14:40	14:45	14:50	14:55	15:00	15:05	15:10	15:15	15:20	15:25	15:30	15:35	15:40	15:45	15:50	15:55	16:00	16:05	16:10	16:15	16:20	16:25	16:30	16:35	16:40	16:45	16:50	16:55	17:00	17:05	17:10	17:15	17:20	17:25	17:30	17:35	17:40	17:45	17:50	17:55	18:00	18:05	18:10	18:15	18:20	18:25	18:30	18:35	18:40	18:45	18:50	18:55	19:00	19:05	19:10	19:15	19:20	19:25	19:30	19:35	19:40	19:45	19:50	19:55	20:00	20:05	20:10	20:15	20:20	20:25	20:30	20:35	20:40	20:45	20:50	20:55	21:00	21:05	21:10	21:15	21:20	21:25	21:30	21:35	21:40	21:45	21:50	21:55	22:00	22:05	22:10	22:15	22:20	22:25	22:30	22:35	22:40	22:45	22:50	22:55	23:00	23:05	23:10	23:15	23:20	23:25	23:30	23:35	23:40	23:45	23:50	23:55	00:00	00:05	00:10	00:15	00:20	00:25	00:30	00:35	00:40	00:45	00:50	00:55	01:00	01:05	01:10

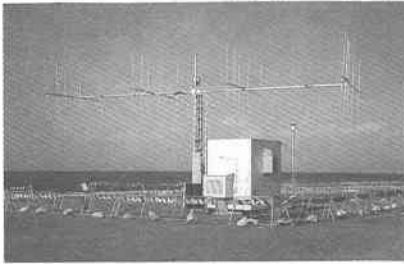


写真-1 海象観測レーダの設置状況

の流れベクトル $V(u, v)$ は、これら両局の流れから次式で計算される。ここで、 u と v はそれぞれ東方分速度と北方分速度である。

$$\left. \begin{aligned} u &= -\frac{V_1 \cos \theta_2 - V_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \\ v &= \frac{V_1 \sin \theta_2 - V_2 \sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

4. 観測方法

図-5に示したように、A局とB局を10 km～15 km程度離して設置する(写真-1)。流れ観測の場合、1方位当たりの観測時間はすでに述べたように、5分間であるので、11個の方位(角度間隔6度)の観測時間は約1時間となる。流れ観測海域は2つのアンテナの照射領域が重なった海域となる。この場合、両局の混信を避けるために、両局のアンテナが向かい合うことが起こらないように、アンテナの方位を図-5に示すビーム番号順で、操作した。

5. 照合観測との比較

海象観測レーダによる流れ観測が有効かどうかは、観測精度で決まる。HFレーダによる流れ観測とその精度に関しての研究は多くあるが、VHFレーダについてはほとんどない。厳密な流れの照合は同一の時刻、場所、測定水深の条件を必要とする。さらに、観測値を求める

ときの空間と時間の平均スケールを合わせる必要がある。このように考えると、次の点がもっとも大きな問題となる。第1は測定水深の相違、第2は空間平均スケールの相違である。第2の問題はレーダ観測がおおよそ0.5 km×0.5 kmの平均スケールに対して、流速計観測は点であることによる。しかしながら、潮流が卓越する湾内で、かつ風が卓越しない気象条件であれば、上記の問題の影響は小さく、レーダ観測と従来測器の係留系のベルゲン流速計観測の同時観測を行うことによって、レーダの流れ観測精度は評価できると考えた。

照合流速観測点は図-7で示した5点である。黒丸の点は、1台の流速計を測定水深-1.0 mに係留した。白丸の観測点では5台の流速計に係留し、それぞれの測定水深は-1.0 m、-3.0 m、-5.0 m、-12.0 m、-19.5 mであった。観測間隔はレーダが1時間毎に対して、流速計は10分間毎であった。今後、測定水深-1.0 mを表層と呼ぶ。

(1) 時系列の比較

図-7は今回レーダで観測された流れベクトル平面分布の1例である。流れベクトルの位置は0.5 km×0.5 kmのメッシュの交差点である。図-8は近くの海岸の風

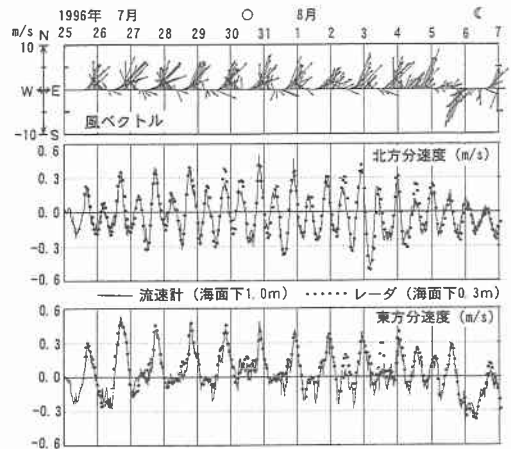


図-8 レーダとベルゲン流速計の流れの時系列比較

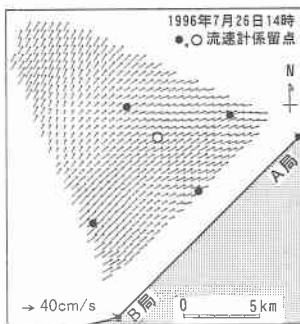


図-7 観測された流れベクトル平面分布

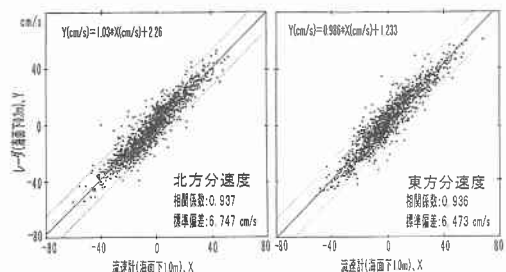


図-9 レーダとベルゲン流速計の相関図

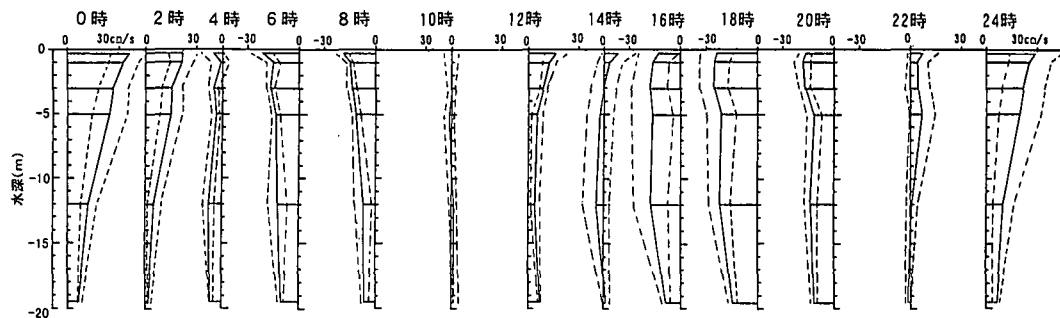


図-11 潮流楕円の長軸方向の流れの鉛直分布

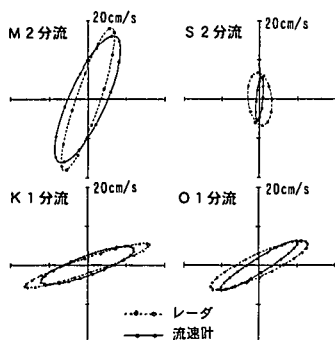


図-10 主要4分潮の潮流楕円の比較

吹送流の影響が小さく、半日周期と日周期の潮流が卓越する流れ場であることから裏付けられた。よって、上述したように、レーダの流れ観測精度は評価できると考えた。図-9はレーダと5つの観測点の表層の流速計の毎時のデータから解析した、両者の相関図である。以上の結果から、両者は非常によく一致した。これによって、レーダの流れ観測は実用的な精度を有すると言える。

(2) 潮流特性の比較

白丸の観測点において、潮流成分を取り出すために、流れデータの調和解析を行った。その結果、図-10に示す主要4分潮の潮流楕円を得た。これから分かるように、水面に近いレーダ観測値の方が少し大きめの楕円となるが、両者は非常によく一致していると言える。

(3) 流れ鉛直分布の比較

鉛直分布は潮流楕円の長軸方向で、白丸の観測点のレーダと5台の流速計の流れデータ、すなわち6層の測定水深のデータから求めた。解析方法は各層で時系列を潮流の日周潮(約25時間)毎に分割し、その間を25等分し、各区分毎集計して平均値と標準偏差値を求めるものである。この解析によって、図-11で示された時間変化

する鉛直分布が得られた。実線は平均値の分布で、点線は平均値±標準偏差値の分布である。これらの流れ鉛直分布から、表層付近では流速の大きな変化(shear)が少ないことが明らかにされた。このことから、レーダと表層の流速計の観測値がよく一致したことが裏付けられた。

6. 結 論

今回、VHFレーダを開発し、表層流の面的な流れ観測装置として、潮流が卓越する海域でベルゲン流速計観測との照合を行い、十分に実用的な観測精度を有することを明らかにした。本開発において、もっとも重要な開発点は合理的なサンプリングと精度の高いアルゴリズムが開発された点である。

最後に、本レーダの開発研究は基盤技術研究促進センターの融資を受けたものであり、また郵政省通信総合研究所の方々から多くの技術的な助言と激励を、またレーダ観測の実施に関係機関の方々に御協力いただきました。ここにあわせて関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 井口俊夫・梅原俊彦・大野祐一・野崎憲朗 (1989): 短波海洋レーダによる海流及び波浪の観測, 通信総合研究所季報, Vol. 35, No. 176, pp. 387-397.
- 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・久木幸治・大野裕一 (1993): 短波海洋レーダによる流れと波浪の計測 (2), 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 126-130.
- 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.
- Stewart, R. H. and J. W. Joy (1974): HF radio measurements of surface currents, Deep-Sea Research, Vol. 21, pp. 1039-1049.