

海洋レーダの技術と歴史*

藤井智史**

Introduction of High-Frequency Ocean Radar : Technology and History

Satoshi Fujii

沿岸海洋研究にとって重要なパラメータである表層の流れや波浪などの海洋情報について、その2次元的な広がりや時間変動を計測する陸上設置型の観測装置として海洋レーダが開発された。このレーダは短波(HF)帯や超短波(VHF)帯の電波を利用し、海面でのBragg共鳴散乱を受信し周波数解析をするドップラーレーダである。その原理、応用ならびに開発の経緯を概説する。また、技術的観点からレーダ方式を分類し、それぞれの方式の特徴について述べる。

Ocean radar, which is a shore-based observation device for measuring horizontally- and temporally- varying information on surface currents and waves for coastal oceanographic research, is developed. The radar is a type of Doppler radar used for observing Bragg backscatter signals from the sea surface, using high-frequency (HF) or very-high-frequency (VHF) bands. The principle, applications and history of the ocean radar are reviewed. This type of radar can be classified into several subtypes based on their technological characteristics. The features of these radar technologies are also summarized.

キーワード：短波(HF), 超短波(VHF), 海洋レーダ, リモートセンシング

1. はじめに

流れや波浪などの海洋情報を計測する際、その空間的広がりや時間的変動を考慮して海上での直接観測を行おうとすると、十分な数の各観測機器を面的に設置する必要がある。船舶での移動観測を連続して行う必要がある。これらの観測では、計測機器の設置や継続して観測するための維持管理に多くの労力と費用を要するのが一般的である。特に、観測点数が多くなるにつれその負担はさらに大きいものとなる。

このような直接観測を補い、現象の空間分布をほぼ瞬時に把握することができる手法としてリモートセンシング技術がある。リモートセンシングは、観測対象に直接触れて直接測定するのではなく、空間や媒質内を伝搬する電磁波や静電磁界、音波、弾性波などを利用して観測対象の情報を、遠隔地に設置されたセンサーを用いて取得する技術である。また、センサーとしては、対象物から発する信号や太陽光の反射波を受け取る受動型センサーとセンサー自ら電磁波などを発信し対象物で反射・散乱されて戻ってくる信号を観測する能動型センサーがある。

特に電波を利用した能動型センサーはレーダと称されており、海面情報を得るレーダの例としてその設置方法や伝搬経路を模式的に Fig. 1 に示す。これらの中でよく知られた海洋のリモートセンシング技術としては、マイクロ波を用いた海面散乱計(scatterometer)や海面高度計(altimeter)などがある。これらは、可視光や赤外線センサー、放射計(radiometer)などの受動型センサーとともに、主に人工衛星を代表とする飛翔体に設置され、その飛行航路に沿って観測し、周回衛星ではその軌道周期に応じた時間間隔で地球上のほぼ全域を観測域と

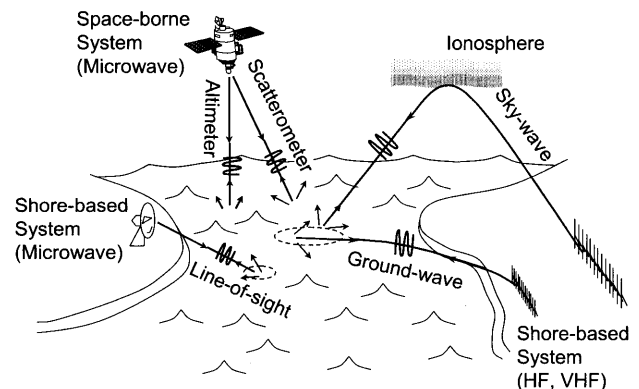


Fig. 1 Several remote sensing devices using backscattered signals for extracting information about the ocean surface (revised Paduan and Graber, 1997¹⁾).

* 2003年6月6日受領, 2003年10月6日受理

** 通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術センター

連絡先: 藤井智史, 通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術センター
〒904-0411 沖縄県国頭郡恩納村字恩納4484

E-mail: fujii@crl.go.jp

している。それらの観測は、広い海域の情報を得るには非常に適しており、空間的に広がる海洋情報の全般的特徴を観測するのに優れている。一方、沿岸域スケールの海洋現象を理解するためには、空間的にも時間的にも高分解能な観測を要するため、人工衛星搭載のリモートセンシング技術はその概観や長期的変化を得るための利用に限られる場合が多い。

このような沿岸域の海洋観測用として、現在、陸上設置型海洋レーダが注目を集めている。観測対象となる海域に隣接して設置することによって、表層流や波浪、海上風向などの空間分布を高分解能に連続的に観測することができる。これらの電波を利用したセンサーでは、使用する電波の周波数によって観測範囲が変わる。マイクロ波のセンサーでは見通し距離内での観測となるが、短波 (HF) 帯や超短波 (VHF) 帯の電波を利用すると地表波 (Ground-wave) 伝搬が利用でき、地平線を越えて広範囲 (最大約200 km) の観測が可能となる。さらに電離層反射波 (Sky-wave) などの伝搬モードにより数千 km の遠方を観測できることも報告されている。

これらの海洋レーダは、陸上に設置することから維持管理が容易になり、荒天時でも運用が可能であったり、海面での直接観測に対して高波や暴風での破損の可能性も低い。また、空間的に広がりを持つ海洋情報をほぼ同時刻で面的に観測でき、連続的に変化を捉えることもできる点で、陸上設置の海洋レーダは沿岸海洋観測には非常に適した観測機器である。海洋レーダの観測例を Fig. 2 に示す。これは豊後水道での急潮現象を捉えたもので、四国岸沿いに北上する流れが明瞭に観測されている。

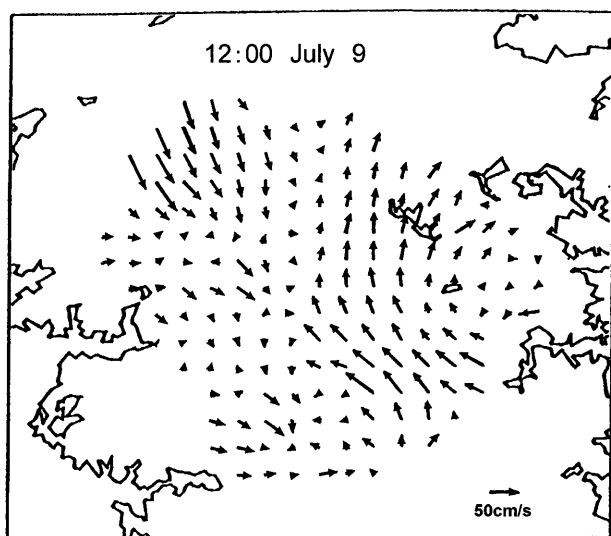


Fig. 2 Surface current measurements by HF ocean radar for Kyucho observations in the Bungo Channel on 9 July, 1992 (Takeoka *et al.*, 1995²⁾).

る。この観測では、急潮の発生から収束に至るまでの流動場の詳細な変化を広範囲な海域で長時間連続に得ることができ、その全体像の把握に威力を発揮した (Takeoka *et al.*, 1995²⁾).

本稿では、短波帯および超短波帯の電波を利用した海洋レーダについて、その開発の沿革ならびに技術的要点について述べる。

2. 海洋レーダの原理

海洋レーダは、Fig. 3 に示すように、陸上に設置したアンテナから海面に向かって電波を照射し、海面での後方散乱波を受信しその信号を解析することにより表層流速や波浪、海上風向などの情報を取得する。

アンテナから照射された電波は海面へほぼ水平入射し入射角は90度に近く、ほとんどのエネルギーは前方散乱するが、波浪により後方に散乱される成分もある。この後方散乱波のうち、照射方向に見て電波の波長の1/2の波長の海洋波による散乱波は位相が同相となるため互いに強められあって受信される (Bragg 散乱共鳴)。受信された信号をスペクトル解析すると、Fig. 4 に見られるよ

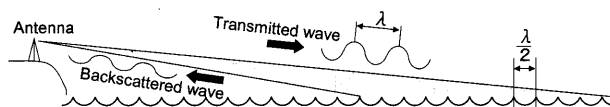


Fig. 3 Principle of the Bragg scattering process in high-frequency ocean radars.

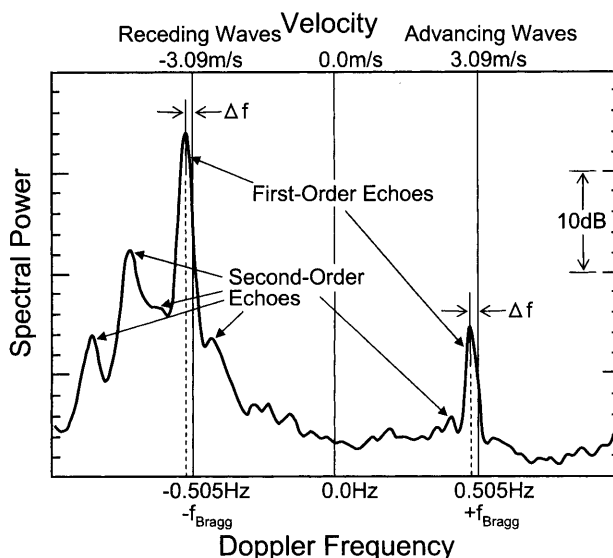


Fig. 4 Sample Doppler spectrum observed by a 24.5MHz radar system. The small Doppler frequency shift, Δf , of the first-order peaking from the Bragg wave frequencies, $\pm f_{\text{Bragg}}$, is due to ocean currents that, in this example, are moving away from the radar.

うなスペクトルパターンが得られる。電波の波長の1/2の波長の海洋波の位相速度に相当するドップラー周波数付近に大きなピークが見られる。これは1次散乱ピークと呼ばれる。波浪はあらゆる方向に伝搬するため、アンテナに向かう方向の成分とアンテナから遠ざかる方向の成分に相当する正と負の周波数領域に対称に2つのピークが存在する。この1次散乱ピークの位置は、その波長に対応したドップラー周波数から一般的にはずれている。それは表層に流れが存在するためであり、1次散乱ピークの位置から電波照射方向（視線方向）の海流速成分を得ることができる。1台のレーダでは、視線方向の流速成分しか得られないため、海流の2次元ベクトルを得るためには同一海域を2方向から観測する必要がある。

ある程度風が吹いている状態では、波浪の最大発達方向が風向と一致することを利用すると、正負の1次散乱ピークの比から海上風向を求めることができる。つまり、正のピーク値が大きければ向かい風、負のピーク値が大きければ追い風、同程度であれば横風と推測される。2方向から観測すれば風向を特定することができる。

海面は種々の波向きや波長を持った成分波から構成されている。その成分波の組み合わせによる干渉や2重散乱により Bragg 散乱条件を満たす散乱波も存在する。それは、1次散乱ピークをもたらす成分波とは異なる速度成分も含むため、1次散乱ピークの周辺のスペクトルパターンとして現れ、2次散乱と呼ぶ。したがって、この2次散乱スペクトルを形づくる成分波の組み合わせの積分方程式を解くことにより、波高や周期などの波浪パラメータを得ることができる。ただし、2次散乱スペクトルは1次散乱スペクトルピークに比べて小さく、スペクトル形状が重要となるため、波浪の観測にはSN比が十分大きいことが条件となる。

3. 開発の沿革

3.1 国外での研究開発

Crombie (1955)³⁾は、短波 (HF) 帯の海面からの反射を受信したところ、そのスペクトルに送信周波数の±1 Hz 内の位置に特異なピークが存在することを発見し、それが海面からの Bragg 散乱共鳴の周波数であることを明らかにした。その後、Peterson *et al.* (1970)⁴⁾が、1.9 MHz で運用されていたロラン A の電波を用いて波浪計測を試みた。

1970年代において、アメリカの大気海洋庁 (NOAA) では Barrick らにより実用に向けたレーダの開発と海面での電波散乱問題の理論的な研究が進められ (Barrick, 1972⁵⁾; Barrick, 1977⁶⁾), しだいに短波海洋レーダの技

術が確立していった。さらに、彼らは海流速計測に関して CODAR (Coastal Ocean Dynamics Application Radar) システムを開発し、いち早く商用化した (Barrick *et al.*, 1977⁷⁾; Lipa and Barrick, 1983⁸⁾)。このシステムは、クロスループアンテナとモノポールアンテナを組み合わせた受信アンテナ1基を用いて全方位からの受信を一度に行い、受信後の解析によって信号到来方向ごとの情報を分離することで海流速の2次元計測を行うのが特徴的である。このほか、アレイアンテナシステムを用いた Marconi 社の OSCR (Ocean Surface Current Radar) システムが有名で、CODAR とともに欧米各地での観測に利用されている。さらに各国で開発されたレーダを列挙すると、Miami 大学や Michigan 大学の協力で開発され多周波観測を売り物にした Metratek 社の HiFAR システム、Hamburg 大学の WERA (Wellen Radar) システム (Gurgel *et al.*, 1999⁹⁾)、カナダの Newfoundland Memorial 大学開発の C-CORE 社のシステム (Hickey *et al.*, 1995¹⁰⁾)、イギリス Birmingham 大学開発の PISCES システム (Shearman and Moorhead, 1988¹¹⁾)、オーストラリア James Cook 大学開発の COSRAD (Coastal Ocean Surface RADar) システム (Heron and McLaren, 1992¹²⁾)、フランス Toulon 大学開発の VHF レーダ (Broche *et al.*, 1987¹³⁾) などが主なものとしてあげることができる。

これらのレーダを活用し、海流観測や潮流解析などの応用観測が数多く行われている。例えば、Prandle, (1991)¹⁴⁾は英国西海岸の7ヶ所に OSCR システムを設置し、複雑な地形効果を受けた沿岸潮流の特徴をレーダ観測から明らかにした。流速計測については、比較的強度の大きい1次散乱ピークを同定するだけで十分であるため、ほぼ実用の域に達している。流速観測の精度検証については、漂流ブイの軌跡から推定される流速との比較 (Barrick *et al.*, 1977⁷⁾; Frisch and Weber, 1980¹⁵⁾; Hickey *et al.*, 1994¹⁶⁾)、係留型流速計や海底設置型 ADCP との検証 (Leise, 1984¹⁷⁾; Matthews *et al.*, 1988¹⁸⁾; Shay *et al.*, 1995¹⁹⁾; Graber *et al.*, 1997²⁰⁾; Nadai *et al.*, 1997²¹⁾)、船舶搭載 ADCP との比較 (Chapman *et al.*, 1997²²⁾) などの結果から、6 cm/s から15 cm/s 程度の差が出るということが報告されている。計測機器による1点観測に対してレーダ計測が面的平均流速を測定していることの違い、および計測水深の差などが原因として挙げられている。

波浪スペクトルの計測は、受信信号スペクトルパターン全体を精度良く得る必要があるため、理論的解析手法の検討はされている (Wyatt, 1990²³⁾; Howell and Walsh, 1993²⁴⁾; Hisaki, 1996²⁵⁾など) が、実データへの応用例は少なく研究途上である。また、海上風向計測については、

Long and Trizna (1973)²⁶⁾の Sky-wave レーダでの計測の試みから検討が続いている (Heron and Rose, 1986²⁷⁾; Harlan and Georges, 1994²⁸⁾; Fernandez *et al.*, 1997²⁹⁾). 風がある程度同一方向に吹いている場合は良い結果を得ることができるが、急激に風向が変化した場合の応答性などは課題となっている。

陸上設置だけでなく、船舶に短波海洋レーダを搭載し観測する試みも実施されている。CODAR システムを船舶搭載した例として、Howell and Walsh(1993)³⁰⁾, Gurgel (1997)³¹⁾がある。また、OSCR システムを搭載した例には、Peters and Skop (1997)³²⁾がある。船舶搭載には、陸上設置だけでは困難な沖合いでの観測を実施できたり、移動することによって1台のレーダで流速ベクトルを計測できる利点がある。しかしながら、船体動揺が受信信号スペクトルに入り込むことの影響を考慮する必要があり、処理法の検討を要する。

電波の波長に応じて Bragg 散乱条件を満たす海洋波の波長が決まる。また、海洋波の波長に応じてその伝播速度が反映する海流の水深が異なる (Stewart and Joy, (1974)³³⁾). この海洋レーダの計測水深が使用する電波の周波数によって変化することを利用し、電波の周波数を複数利用することにより、鉛直方向の流れの構造を計測する試みがなされている (Fernandez *et al.*, 1996³⁴⁾; Teague *et al.*, 2001³⁵⁾).

また、海洋レーダで観測された表層流速データを数値流動モデルとリンクさせて3次元の流速場を推定 (Valk, 1999³⁶⁾) したり、海洋流動モデルの表層流速としてデータ同化に用いる手法が検討されている (Lewis *et al.*, 1998³⁷⁾).

3.2 国内での開発動向

国内においては、1970年代から1980年代初めに気象庁や海上保安庁にて短波海洋レーダの導入の検討がされたようであるが実現に至らなかった。その後、郵政省電波研究所 (現 通信総合研究所) において、ロラン A の電波を使った基礎的な検討がなされただけであった。

本格的な研究の開始は、1988年に電波研究所沖縄電波観測所 (現 通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術センター) にて24.5 MHz 帯を使った日本最初の海洋レーダが完成してからである (猪股ほか, 1991³⁸⁾). このレーダは可搬型コンテナに収めることができるため、全国各地に移動して各大学や研究機関との共同観測が数多く実施された (藤井, 2001³⁹⁾). それらの成果に関して、1996年海洋学会春季大会でシンポジウムが開催された (日本海洋学会, 1996⁴⁰⁾). また、共同研究を通して他機関やメーカーへの技術移転も実施され、1997年には商用の VHF 海洋レーダが開発された (徳田・渥美, 1997⁴¹⁾;

徳田ほか, 1997⁴²⁾). さらに、DBF(Digital Beam Forming) 技術を用いた海洋レーダの開発が着手され、遠距離 (~200 km) 探査用レーダ (佐藤ほか, 2002⁴³⁾) と VHF 帯を用いた沿岸観測用レーダ (坂井ほか, 2002⁴⁴⁾) として実現している。

これらの成果から海洋レーダの有用性が実証され観測機器としての認知が広まっていった。現在、Table. 1 に示すように国内の各研究機関、自治体、海洋観測企業に海洋レーダが導入されている。

Table 1 HF/VHF ocean radars which are available in Japan.

Organization	Radar type (frequency, etc.)	No.	Notes	
Communications Research Laboratory (通信総合研究所)	- 24.5MHz Phased Array	2	Portable system	1988
	- 24.5MHz DBF prototype	1	Prototype	
	- 9.2MHz DBF Long-range	2	Deployed at Yonaguni Is and Ishigaki Is.	
Kokusai kogyo Co. Ltd. (国際航業)	- 41.9MHz Stacked Yagi Ant.	2	Portable, Commercial use	1997
National Institute for Land and Infrastructure Management (国土技術政策総合研究所)	- 24.5MHz Phased Array	2	Portable system	1998
Mie prefecture (三重県)	- 24.5MHz Phased Array	2	For wave observation at Kumano-Nada	1998
Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard (海上保安庁海洋情報部)	- 5.1MHz CODAR	2	Deployed at Hachijo Is. and Nojima-saki	2001
	- 24.5MHz Phased Array	2	Deployed at Sagami-wan	
Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ. (九州大学応用力学研究所)	- 13.9MHz CODAR	5	Deployed at Tsushima strait	2002
	- 24.5MHz Phased Array	2	Portable System (mainly for Tsushima strait)	
Central Research Institute of the Electric Power Industry (電力中央研究所)	- 41.9MHz DBF	2	Portable System	2002
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ. (北海道大学低温科学研究所)	- 13.9MHz CODAR	3	Deployed at Soya strait	2003
	- 24.5MHz CODAR	2	For the sea-ices observation of the Sea of Okhotsk	

4. 海洋レーダの技術

海洋レーダには、いくつかの観点から、その方式を分類することができる。

4.1 使用周波数と伝搬経路

一般的に広く使われているレーダ (気象レーダ, 航空管制レーダ等) は、主に波長が 1 cm ~ 数 10 cm のマイクロ波帯の電波を利用している。この周波数では、電波は直進性が高いため見通し範囲でしか観測できない。これに対して、海洋レーダで利用している HF 帯や VHF 帯では地表に沿って伝搬し、地球の曲率により見通し外となる水平線を越えた距離までの情報を得ることができる。

地表波伝搬では、地表面を誘電体として取り扱い誘電体表面伝搬となり、近距離では距離に反比例、遠距離では距離の 2 乗に反比例して減衰する。さらに地球表面が曲面であることから、さらに遠方では回折効果で伝搬することになり指数関数的に減衰する。また、伝搬経路中の海面で波高が高い場合は、途中で電波が散乱し伝搬損失が増大する。このような伝搬モードでは、使用周波数は低い方が伝搬損失は小さくなり、遠距離の観測には有利となる。海面状態で大きく異なるが、一般に 40 MHz 帯で 2 ~ 30 km, 25 MHz 帯で 50 km, 10 MHz 帯で 200 km 程度の距離まで観測できるといわれている。

このほかに、Fig. 1 に示すように、電離層での反射波を利用した 500 km ~ 4,000 km 遠方の海面からの反射波を受信する空間波 (Sky-wave) レーダも報告されている

(Anderson, 1986⁴⁵); Georges and Harlan, 1994⁴⁶); Georges *et al.*, 1998⁴⁷). Sky-wave レーダの受信信号には海面での情報だけでなく、電離層の変動による成分も含まれるため、必要な海洋情報を抽出する処理法が必要となる。また、観測距離が大きいので、それに見合った十分な角度分解能を確保するためには長大な開口長のアンテナが必要であり、広大な敷地を要する。

4.2 距離情報

レーダで距離方向の情報は、受信信号の距離特性から得られる。この距離情報抽出のための送信波変調方式によりレーダ方式の種類が分類される。

・パルスレーダ

パルスレーダは、Fig. 5 に示すように短いパルス状の信号を送信し、目標物で散乱しレーダまで戻ってくるまでの往復時間からレーダと目標物間の距離を計測するレーダである。距離分解能 Δr は、送信パルス幅を t 、光速を c とした場合、 $\Delta r = ct/2$ と表され、パルス幅が狭いほど距離分解能が向上する。ただし、パルス幅が狭くなると平均送信電力が小さくなり、受信信号の SN 比が悪くなるため観測可能距離が制限されることとなる。

・FMCW レーダ

FMCW レーダは、周波数変調 (FM: Frequency Modulation) された連続波 (CW: Continuous Wave) を送信する。Fig. 6 に示すように送信信号の周波数変調は、周波数を一方に掃引するのが一般的である。目標物で散乱され戻ってくる受信信号の周波数は、レーダと目標物の間の距離に応じた遅延時間を持つため、受信時の送信周波数と比較すると、その遅延時間に対応した周波数差を生じる。つまり、受信信号と送信信号の差周波数をとると、近い距離ほど低周波成分、遠い距離ほど高周波成分となり、受信信号の周波数解析により距離情報を得る事ができる。FMCW レーダの距離分解能はこの周波数解析の分解能に相当し、周波数掃引幅 B で決まり、 $\Delta r = c/2B$ となる。

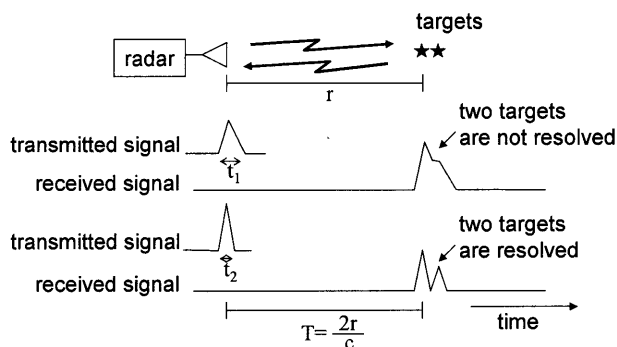


Fig. 5 Pulse radar: The distance of the scatter is determined from the traveling time of the transmitted short pulse. The shorter pulse results in a higher range resolution.

実際のレーダでは、送信信号が受信機へ漏れ込む事を防止するため、連続送信ではなく送受信を交互に切り替える、送受切替型 FMCW (FMICW: Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave, または、パルスドチャープ: Pulsed Chirp) 方式が用いられている。

・符号変調レーダ

この方式では、送信波形に単一の短パルス波形を用いるのではなく、符号変調した信号を送信信号とする。符号系列として11段バーカー (Barker) 系列の波形を使用した例を Fig. 7 に示す。受信信号と送信信号との相関関

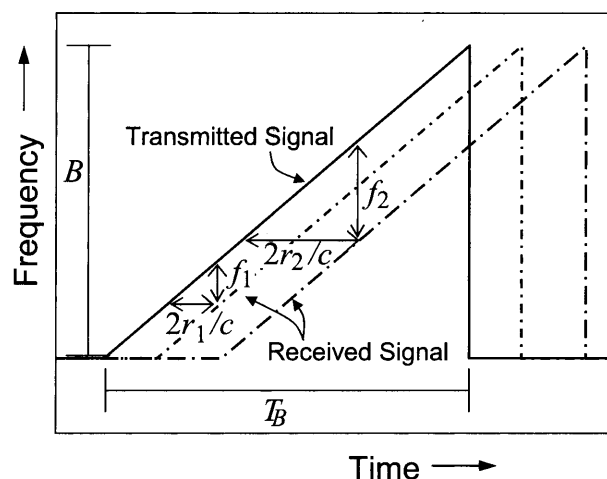


Fig. 6 FMCW radar: The frequency of the transmitted signal is shown by a solid line, with the frequency of the returned signals from the two different targets shown as dashed lines. The differences in frequencies, f_1 and f_2 , depend on the target distances, r_1 and r_2 .

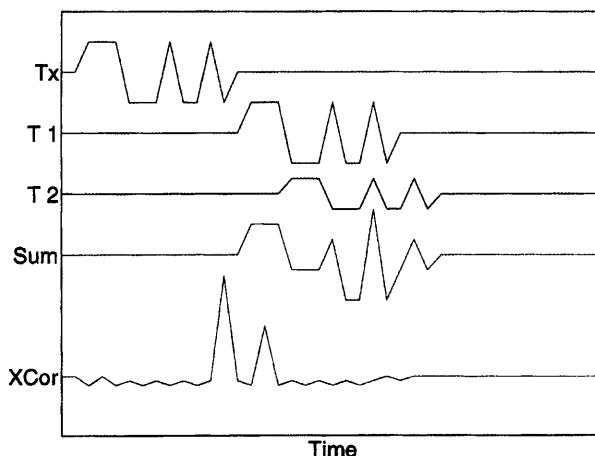


Fig. 7 Coded waveform radar: The transmitted signal (Tx) is modulated by an 11-element Barker code. The individual returns (T1, T2) are from two discrete targets at different distances. The received signal (Sum) is the sum of their signals. The cross-correlation function (XCor) between the received signal and the transmitted signal resolves the two peaks which correspond to the two targets (Teague *et al.*, 1997⁴⁸).

数を計算することによって、距離方向の情報を得るものである。この方式において距離分解能を上げるには系列を長くすれば良いが、送信時間が長くなり近距離の観測に支障をきたすことになる。

4.3 方位情報

方位方向の情報は、アンテナの指向特性を利用して得られる。その方法としては、特定の方向に鋭い指向性を持った狭ビームを物理的または電子的に方位角方向に走査する方法と、観測領域の全方位からの信号を同時に受信したのち各到来方向ごとの信号を分離する方法の2通りがある。

・狭ビーム走査

この方式では、Fig. 8に示すように対象海域全体を観測するために、送受信ビームを方位角方向に走査する。空間分解能の向上には、ビーム幅を狭くし方位角分解能を高めることになる。狭ビームの指向特性を得るためには、単体で指向性を持つ指向性アンテナを用いるか、素子アンテナを組み合わせたフェーズドアレイアンテナで実現するかの2通りがある。ビーム幅は波長に比例しアンテナ開口に反比例するため、HF帯やVHF帯のような長波長の領域では狭ビームパターンを得るには物理的に大掛かりなアンテナになる。

この周波数帯での指向性アンテナとしては、八木アンテナが一般的であり、42 MHz帯レーダでの使用例としてFig. 9(a)に形状を示す。このアンテナではビーム幅 20° を確保するために5エレメント八木アンテナ4段スタックアレイが用いられている(徳田・渥美, 1997⁴¹⁾)。このアンテナの方位方向走査は機械的に回転させている。これの利点は、障害物や干渉物がない場合、方向によって指向性が変化せず全方位走査が可能である点である。ただし、かなり重量のある大きなアンテナを物理的に回

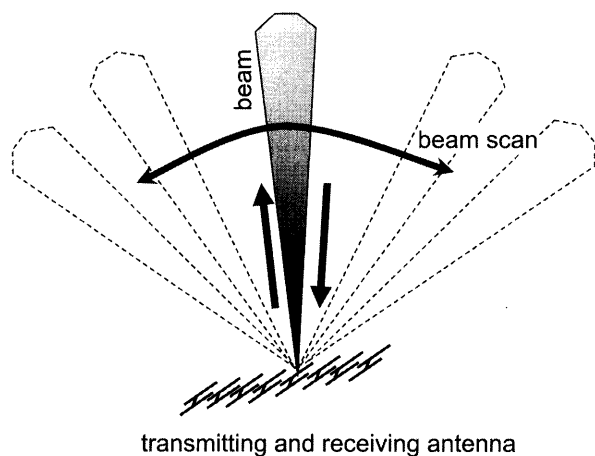


Fig. 8 Narrow beam scanning over the observation area by a steering beam.

転させるため、風による動揺を防いだり耐風圧性能の高い回転機構が必要となる。

フェーズドアレイアンテナは、素子アンテナを配列し、その給電位相を各素子ごとに変化させることにより、アレイアンテナ全体での指向性を形成する。24.5 MHz帯レーダでの使用例をFig. 9(b)に示す。この例では、反射器付きモノポールアンテナを素子アンテナとし、 $1/2$ 波長間隔で直線状に10素子配置することにより、正面方向でビーム幅 15° を得ている(藤井, 2001³⁹⁾)。フェーズドアレイアンテナの場合、給電位相の設定は電子的に行えるため、方位方向走査にアンテナ自体の回転や移動の必要がなく、瞬時に方向設定ができる。ただし、直線配列のアレイアンテナの場合、方位によってビームパターンが変化するという、素子アンテナ配置に係る問題がある。

・到来方向分離

この方式では、Fig. 10に示すように送信アンテナから観測領域全体に電波を照射し、受信アンテナでは全方位からの信号を同時に受信した後、信号処理により各到来方向の情報を分離する。狭ビーム走査方式では、観測領域全体の観測を各ビームごとに行うため各方位の情報に時間差が生じるが、到来方向分離方式では全領域を同時に観測するため同時性が確保できる。到来方向分離の方式として、アレイアンテナ利用のDBF (Digital Beam Forming) とクロスループアンテナを用いた例が実用化されている。

アレイアンテナDBFは、フェーズドアレイアンテナの一種であり、各素子アンテナすべてに受信機とA/D変換器をそなえ、ビーム形成をデジタル信号処理で行っている。

8の字指向性を持つループアンテナを直交させて配置し、さらにモノポールアンテナとを組み合わせる到来方向分離を行うアンテナの例をFig. 9(c)に示す(Lipa and Barrick, 1983⁸⁾)。この方式ではほぼ全方位観測が可能なこととアンテナシステムが小型化できることが利点である。

4.4 ベクトル量計測

1台のレーダでは、そのビームの視線方向の成分しか得られないため、2次元流速場などの2次元ベクトル量を得るためには同一海域を2方向から観測する必要がある。

その手法として一般的なのは、2台のレーダを用いてFig. 11に示すように2ビームの交差する点において、2ビーム視線方向の成分をベクトル合成する方法である。このベクトル合成の誤差は2ビームのなす角が 90° のときに最小になり、それ以下でも以上でも大きくなる(Nadai et al., 1999⁴⁹⁾)。

送信と受信を同位置で行い後方散乱波を受信する一般的なレーダ(モノスタティックレーダ)だけでなく、送信

海洋レーダの技術と歴史

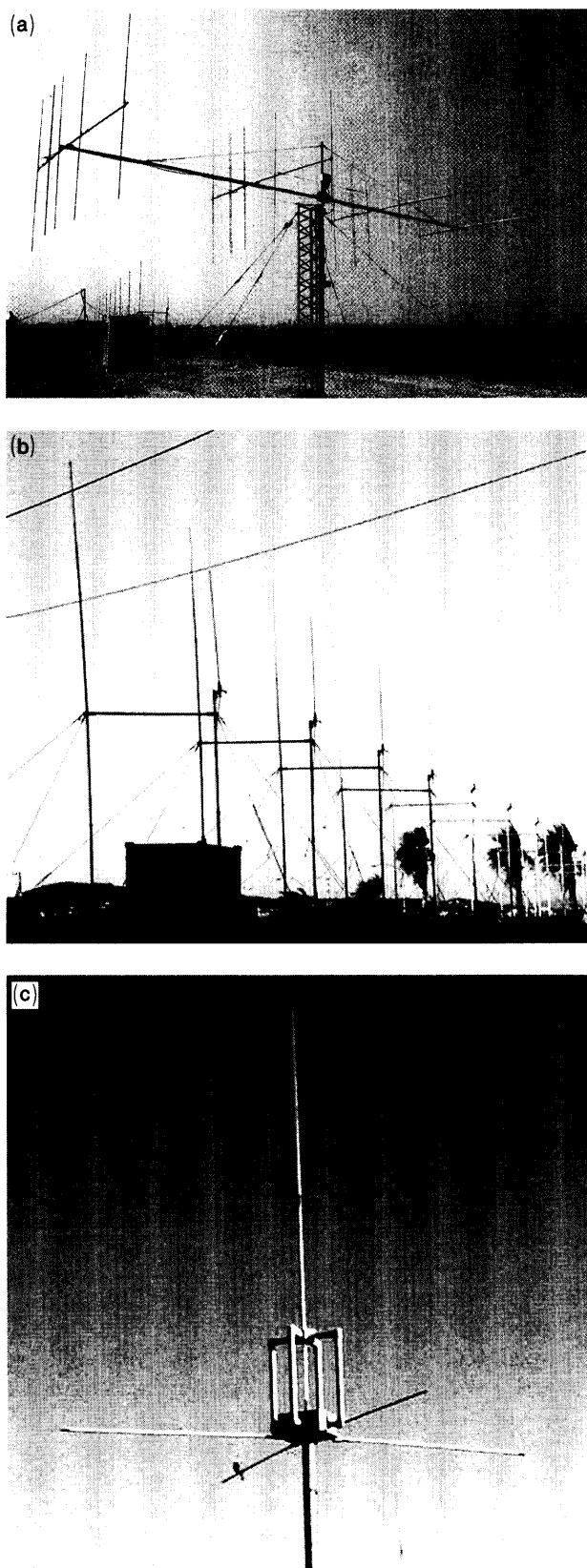


Fig. 9 Antenna types of HF ocean radars : (a) stack of four 5-element Yagi antennas, (b) phased array antenna (10-element linear array), (c) combination of two crossed loops and monopole antennas of a CODAR system.

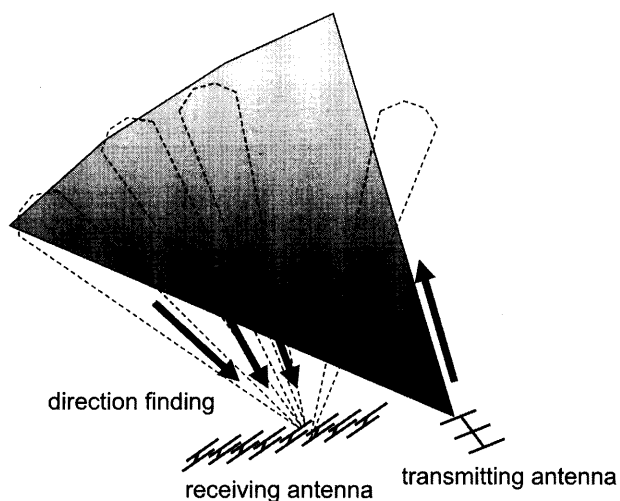


Fig. 10 Direction finding of the scattered signal from the ocean surface of the observation area which is flooded by the broad transmitted beam.

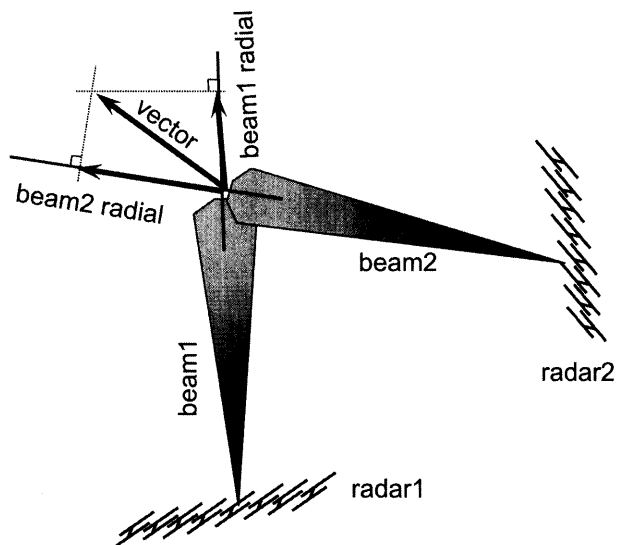


Fig. 11 Vectorization of the two radial current velocities observed by the two radars.

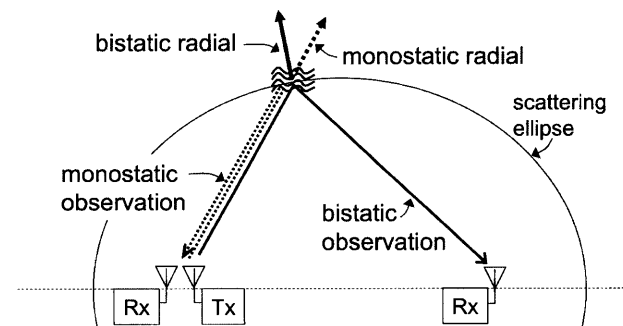


Fig. 12 The current velocity normal to the scattering ellipse curve is observed by the bistatic configuration. The current vectors can be measured by the single transmitter system with the combination of monostatic and bistatic observations. Tx and Rx represent the transmitter and receiver, respectively.

点から遠隔の地点に受信機を置き散乱体からの側方散乱を受信するバイスタティック構成を併用すると、Fig. 12に示すように送信機を1台で済ませることができる。この構成には、送信機数が減ることによる混信低減や周波数有効利用、コスト削減の利点がある。バイスタティック観測では送信点と受信点を焦点とする楕円の法線方向の速度成分が得ることができ(Gill and Walsh, 2001⁵⁰⁾)、モノスタティック観測や別のバイスタティック観測と合成することによりベクトル量を得ることができる。

このほかに、受信アンテナを2組離して配置し、ビーム方向と同時に、アンテナ配置方向の速度成分を求める干渉法またはSA (Spaced Antenna) 法と呼ばれる手法の研究もなされている(May *et al.*, 1990⁵¹⁾)。

5. まとめ

海洋レーダは、陸上設置型の沿岸域の海洋観測装置として有効性が認識されつつある。特に表層流速分布の計測については、国内外の実績から実用段階であり調査・観測に活用されている。波浪観測については、解析手法に関してまだ課題が残っているが、今後研究がすすむと考えられ、期待される分野である。また、海洋レーダだけでなく、衛星観測と同期させた広域な海象現象の理解、2次元流速場と鉛直プロファイルとの組み合わせによる3次元流速場のモデル構築など、他の観測機器と連携することにより、質の高い効率的な観測が実施できるであろう。

本稿では海洋レーダに関わる主に技術的要件について紹介したが、他の側面として、無線局免許の問題がある。海洋レーダは、電波利用機器として無線従事者免許ならびに無線局免許を必要とするが、開設にあたり使用周波数の確保がまず問題となる。HF帯やVHF帯は通信・放送の業務で幅広く使用されており、レーダで必要となる数10 kHz～数100 kHzの帯域を割り当てるのは困難を極めている。そのため、現在国内で設置している海洋レーダは複数台が同一周波数を利用している。HF/VHF帯は本来遠距離に届くため、今後利用が進むにつれてレーダ間の混信や他の業務への妨害の問題が発生する可能性もある。海洋レーダの有効な利用に向けては、ユーザ間の調整や専用周波数割当の検討を進めるとともに、周波数共用技術、狭帯域化技術などの技術面での解決方法の開発も重要となる。

参考文献

- 1) Paduan, J. D. and H. C. Graber (1997): Introduction to high-frequency radar: reality and myth. *Oceanography*, **10**, 2, 36-39.
- 2) Takeoka, H., Y. Tanaka, Y. Ohno, Y. Hisaki, A. Nadai, and H. Kuroiwa (1995): Observation of the Kyucho in the Bungo channel by HF radar. *J. Oceanogr.*, **51**, 699-711.
- 3) Crombie, D. D. (1955): Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s. *Nature*, **175**, 681-682.
- 4) Peterson, A. M., C. C. Teague, and G. L. Tyler (1970): Bistatic radar observations of long-period directional ocean wave spectra with LORAN-A. *Science*, **170**, 158-161.
- 5) Barrick, D. E. (1972): First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **AP-20**, 2-10.
- 6) Barrick, D. E. (1977): Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra. *Radio Science*, **12**, 415-424.
- 7) Barrick, D. E., M. W. Evans, and B. L. Weber (1977): Ocean surface currents mapped by radar. *Science*, **198**, 138-198.
- 8) Lipa, B. J. and D. E. Barrick (1983): Least-squares method for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: Application at ARSLOE. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **OE-8**, 226-305.
- 9) Gurgel, K.-W., G. Antonischki, H.-H. Essen, and T. Schlick (1999): Wellen radar (WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing. *Coastal Engineering*, **37**, 219-234.
- 10) Hickey, K., R. H. Khan, and J. Walsh (1995): Parametric estimation of ocean surface currents with HF radar. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **OE-20**, 139-144.
- 11) Shearman, E. D. R. and M. D. Moorhead (1988): PISCES: a coastal ground-wave HF radar for current, wind and wave mapping to 200 km ranges. *Proceedings IGARSS '88*, 773-776.
- 12) Heron, M. L. and N. R. McLaren (1992): Groundwave HF ocean surface radar. *Proceedings PORSEC '92*, 71-75.
- 13) Broche, P., P. Forget, C. de Maistre, J. L. Devenon, and M. Crochet (1987): VHF radar for ocean surface current and sea state remote sensing. *Radio Science*, **22**, 69-75.
- 14) Prandle, D. (1991): A new view of near-shore dynamics based on observations from HF radar. *Prog. Oceanog.*, **27**, 403-438.
- 15) Frisch, A. S. and B. L. Weber (1980): A new technique for measuring tidal currents by using a two-site HF Doppler radar system. *J. Geophys. Res.*, **85**, 485-493.
- 16) Hickey, K. J., E. W. Gill, J. A. Helbig, and J. Walsh (1994): Measurement of ocean surface currents using a long-range, high-frequency ground wave radar. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **OE-19**, 106-113.
- 17) Leise, J. A. (1984): The Analysis and digital signal processing of NOAA's surface current mapping system. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **OE-9**, 106-113.
- 18) Matthews, J. P., J. H. Simpson, and J. Brown (1988): Remote sensing of shelf sea currents using a high-frequency ocean surface current radar system. *J. Geophys. Res.*, **93**, 2303-2310.
- 19) Shay, L. K., H. C. Graber, D. B. Ross, and R. D. Chapman (1995): Mesoscale ocean surface current structure detected by high-frequency radar. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **12**, 881-900.
- 20) Graber, H. C., B. K. Haus, R. D. Chapman, and L. K. Shay (1997): HF radar comparisons with moored estimates of current speed and direction: expected differences and implications. *J. Geophys. Res.*, **102**, 18, 749-18, 766.
- 21) Nadai, A., H. Kuroiwa, M. Mizutori, and S. Sakai (1997): Measurement of ocean surface currents by CRL HF ocean surface radar of

海洋レーダの技術と歴史

- the FMCW type. Part 1. radial current velocity. *J. Oceanogr.*, **53**, 325-342.
- 22) Chapman, R. D., L. K. Shay, H. C. Graber, J. B. Edson, A. Karachintsev, C. L. Trump, and D. B. Ross (1997): On the accuracy of HF radar surface current measurements: intercomparisons with ship-based sensors. *J. Geophys. Res.*, **102**, 18, 737-18, 748.
- 23) Wyatt, L. R. (1990): A relaxation method for integral inversion applied to HF radar measurement of the ocean wave directional spectrum. *J. Remote Sens.*, **11**, 1481-1494.
- 24) Howell, R. and J. Walsh (1993): Measurement of ocean wave spectra using narrowbeam HF radar. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **OE-18**, 296-305.
- 25) Hisaki, Y. (1996): Nonlinear inversion of the integral equation to estimate ocean wave spectra from HF radar. *Radio Science*, **31**, 25-39.
- 26) Long, A. E. and D. B. Trizna (1973): Mapping of north Atlantic winds by HF radar sea backscatter interpretation. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **AP-21**, 689-685.
- 27) Heron, M. L. and R. J. Rose (1986): On the application of HF ocean radar to the observation of temporal and spatial changes in wind direction. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **OE-11**, 210-218.
- 28) Harlan, J. A. and T. M. Georges (1994): An empirical relation between ocean-surface wind direction and the Bragg line ratio of HF radar sea echo spectra. *J. Geophys. Res.*, **99**, 7971-7978.
- 29) Fernandez, D. M., H. C. Graber, J. D. Paduan, and D. E. Barrick (1997): Mapping wind direction with HF radar. *Oceanography*, **10**, 93-95.
- 30) Howell, R. and J. Walsh (1993): Measurement of ocean wave spectra using a ship-mounted HF radar. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **OE-18**, 306-310.
- 31) Gurgel, K.-W. (1997): Experience with shipborne measurements of surface current fields by HF radar. *Oceanography*, **10**, 82-84.
- 32) Peters, N. J. and R. A. Skop (1997): Measurements of ocean surface currents from a moving ship using VHF radar. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **14**, 676-694.
- 33) Stewart, R. H. and J. W. Joy (1974): HF radio measurement of surface currents. *Deep Sea Res.*, **21**, 1039-1049.
- 34) Fernandez, D. M., J. F. Vesecky, and C. C. Teague (1996): Measurements of upper-ocean surface current shear with high-frequency radar. *J. Geophys. Res.*, **101**, 28, 615-28, 625.
- 35) Teague, C. C., J. F. Vesecky, and Z. R. Hallock (2001): A comparison of Multifrequency HF radar and ADCP measurements of near-surface currents during COPE-3. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **OE-26**, 399-405.
- 36) de Valk, C. F. (1999): Estimation of 3-D current fields near the Rhine outflow from HF radar surface current data. *Coastal Engineering*, **37**, 487-511.
- 37) Lewis, J. K., I. Shulman, and A. F. Blumberg (1998): Assimilation of Doppler radar current data into numerical ocean model. *Continental Shelf Res.*, **18**, 541-559.
- 38) 猪股英行編 (1991): 短波海洋レーダ. 通信総合研究所季報, **37**, 343-438.
- 39) 藤井智史 (2001): HFレーダによる観測. p. 68-89, 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会.
- 40) 日本海洋学会 (1996): シンポジウムF「海洋レーダ」. 1996年度日本海洋学会春季大会予稿集, 536-557.
- 41) 徳田正幸・渥美泰彦 (1997): 超短波を利用した「海象観測レーダ (Sea Watcher)」の流れ観測装置の開発. *EMC*, **111**, 31-39.
- 42) 徳田正幸・中村和男・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*, **44**, 1276-1280.
- 43) 佐藤健治・松岡建志・藤井智史 (2002): 遠距離海洋レーダシステムの開発. *通信総合研究所季報*, **48**, 221-227.
- 44) 坂井伸一・平口博丸・松山昌史・坪野考樹・森信人・杉山陽一・藤井智史・佐藤健治・松岡建志 (2002): 短時間観測が可能なデジタルビームフォーミング方式による沿岸海洋レーダの開発. *海岸工学論文集*, **49**, 1511-1515.
- 45) Anderson, S. J. (1986): Remote sensing with the JINDALEE skywave radar. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **OE-11**, 158-163.
- 46) Georges, T. M. and J. A. Harlan (1994): New horizons for over-the-horizon radar?. *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, **36**, 14-24.
- 47) Georges, T. M., J. A. Harlan, R. R. Leben, and R. A. Lematta (1998): A test of ocean surface-current mapping with over-the-horizon radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **36**, 101-110.
- 48) Teague, C. C., J. F. Vesecky, and D. M. Fernandez (1997): HF radar instruments, past to present. *Oceanography*, **10**, 40-44.
- 49) Nadai, A., H. Kuroiwa, M. Mizutori, and S. Sakai (1997): Measurement of ocean surface currents by CRL HF ocean surface radar of the FMCW type. Part 2. current vector. *J. Oceanogr.*, **55**, 13-30.
- 50) Gill, E. W. and J. Walsh (2001): High-frequency bistatic cross sections of the ocean surface. *Radio Science*, **36**, 1459-1475.
- 51) May, P. T., B. L. Weber, R. G. Strauch, R. J. Latatits, K. P. Moran, and D. A. Merritt (1989): Single station ocean current vector measurement: application of the spaced antenna (SA) technique. *Geophys. Res. Letters*, **16**, 999-1002.

より詳細な解説は下記を参照されたい。

- 52) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 (2001): 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測. 土木学会, 212pp.
- 53) Trizna, D. B. and R. E. Jensen (1997): Special issue on high frequency radars for coastal oceanography. *Oceanography*, **10**, 34-95.

質疑応答

問: 海上風向風速を測る原理は?

(東大海洋研, 杉本隆成)

答: 本文中にあるように, 波浪の最大発達方向が風向と一致することを利用し, 正負の1次散乱ピークの比から海上風向を求める. 風速についてはより多くの仮定が必要となり簡単に求めることは困難である.

問: 風波の振幅の増え方から見るとということだと飽和状態の風波は捉えられず発達中の領域しか捉えられないということか?

(東大海洋研, 杉本隆成)

答: 海洋レーダでは, 海流速の計測には Bragg 共鳴散乱をおこす海洋波 (電波の波長の1/2の波長の波) からの散乱波を受信して観測し, 波浪計測には海洋波での

藤 井 智 史

多重散乱を含めて共鳴条件に合致する散乱波を受信して観測している。そのため、観測対象になる波浪は使用する電波の波長にのみ関連し、特に風波の飽和状態に関わりなく計測可能である。

問：海流の推算に主に使う周波数帯は有義波か？

(東大海洋研, 杉本隆成)

答：海流速計測には、有義波のような統計的な波浪ではなく、使用する電波の波長の1/2となる波長の波を使っている。

問：観測に使う波は群速度と位相速度のどちらを見ているのか？

(北大水産, 磯田 豊)

答：位相速度を見ている。

問：岸沖方向の情報はどのように分けるのか？

(北大水産, 磯田 豊)

答：電波の往復する時間で距離情報を得ている。

問：鉛直方向に少し深い水深の流れも測れる可能性があるということだが、具体的には水深何 m くらいまでの流れが測れるのか？

(京大農, 笠井亮秀)

答：対象としている波長の重力波の位相速度がどの水深の流れを反映しているかによる。波長を λ とすると、 $\lambda/4\pi$ 程度の深さの流れを表していると言われている。