4-12 遠距離海洋レーダシステムの開発

4-12 Development of Long-Range Ocean Radar System

佐藤健治 松岡建志 藤井智史 SATO Kenji, MATSUOKA Takeshi, and FUJII Satoshi

要旨

通信総合研究所は、新しい短波海洋レーダシステムである遠距離海洋レーダシステムを開発し、琉球列島の石垣島と与那国島の2島に設置した。遠距離海洋レーダは陸上から200km沖合までの範囲の表層流が距離分解能約7kmで計測可能であり、2001年7月より東シナ海南部の黒潮上流域の実験観測を開始した。

Communications Research Laboratory developed a new high-frequency ocean surface radar system named Long-Range Ocean Radar (LROR) that is composed of two radars located on two of the Ryukyu Islands in the southwest part of Japan. LROR is designed to observe surface currents up to 200 km from the radar sites with range resolution of 7 km and will be used for the experimental observation of upper region of the Kuroshio Current in the southern part of the East China Sea. We started performance evaluations and experimental observations in July, 2001.

[キーワード]

短波海洋レーダ, 表層流, 黒潮, リモートセンシング HF radar, Surface current, Kuroshio current, Remote sensing

1 まえがき

短波海洋レーダはドップラーレーダの一種で、海面に向かって放射された短波帯の電波の後方散乱波を周波数解析することにより、海洋表面流速、海上風、波浪などの海洋表面情報を得ることができるリモートセンサーである。船舶や係留ブイに備え付けられた流速計等による従来の海洋観測手法ではある特定の場所での情報しか得られないのに対し、短波海洋レーダを用いた場合は陸上にいながらにして広い海域を連続的に観測できる。このため近年、海洋学、海岸工学、水産業等の分野で特に注目を集めている。

欧米などでは1970年代より短波海洋レーダの研究開発が活発になり、長期間にわたって広い海域の流速場を連続観測するのに最適なセンサーとしての有効性が認められてきた。通信総合研究所では独自で1986年より送信周波数

24.5MHzの短波海洋レーダの開発に着手し、1988年に日本で初めての短波海洋レーダを完成させた。以来、様々な研究機関と共同で日本各地の海洋観測を行うとともに、システムの改善やデータ解析手法等の研究を行ってきた。しかし、現有の24.5MHz帯短波海洋レーダは最大観測可能距離が100kmに満たないため沿岸域等、小規模なスケールでの海洋観測には適している一方、黒潮などの大規模なスケールでの観測は困難である。そこで、より遠方まで観測できる短波海洋レーダとして1999年に周波数9.2MHz帯を使用する遠距離海洋レーダの開発に着手し、2001年7月に完成させた。

2 短波海洋レーダの計測原理

短波海洋レーダによる海洋表面情報の計測法 は海洋表面波による電磁波の散乱理論に基づい



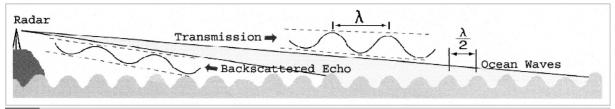


図 1 海洋レーダの観測概念図

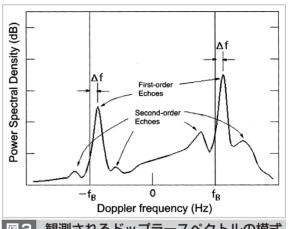
ている[1]~[4]。図1に短波海洋レーダによる観測の概念図を示す。陸上に設置したレーダから短波帯の電波を海面に照射すると、電波はその波長の1/2の波長を持つ海面の波浪によってブラグ散乱を受け、強い後方散乱波が生じる。この後方散乱波を受信して周波数解析すると、ブラッグ散乱に寄与する波の位相速度に対応したドップラー周波数付近に一次散乱エコーと呼ばれる鋭いピークが現れる。図2に海洋レーダによって測定されたドップラースペクトルの模式図を示す。ドップラー周波数が正のピークは遠ざかる波にそれでに近づく波、負のピークは遠ざかる波にそれぞれ対応する。図中の f_B は静止海面におけるブラッグ散乱に寄与する波の位相速度 C_0 に対応するドップラー周波数であり、送信波の波長 λ を用いて

$$f_B = \pm \frac{2C_0}{\lambda}$$

で与えられる。またブラッグ散乱に寄与する波 の位相速度 G は、波の分散関係式から

$$C_0 = \sqrt{\frac{g\lambda}{4\pi}}$$

で与えられる。ここで g は重力加速度を表す。実際に観測される一次散乱エコーのピーク周波数に対応するドップラー速度は、静止海面における波の位相速度に海流のレーダ視線方向の速度はがってある。したがって、一速度が出たものである。したがってラー速度がである。かできる。ただし、1台のレーダ速度ができる。ただし、1台のレーダで速速ができる。ただし、1台のレーダで速速ができる。ただし、1台のレーダで速速ができる。ただし、1台のレーダで速速ができる。ただし、1台のレーダで速速ができる。ただし、1台のレーダで速速ができる。ただし、1台のレーダで速速ができる。ただし、1台のレーダで速速ができる。ただし、1台のレーダで表方には、複数のレーダを用いて異なったができるのようには、複数のレーダを用いて異なったができる。合成された流速ベクトルの誤



2 観測されるドップラースペクトルの模式 図

差は二つのレーダビームの交差角 α に依存する。 計測された各視線方向流速が独立でその計測誤 差が等しいとすると、流速ベクトルの誤差は視 線方向流速の計測誤差の $1/|\sin(\alpha)|$ 倍となる[5]。

また、海洋表面波に伴う水粒子の垂直面内での運動の解析から、短波海洋レーダによって計測される流速は海面から $\lambda/8\pi$ 程度の深さにおける流速に対応することが示されている[4]。

海洋レーダで観測される波長数mの波浪は、 主に現場近くの海上風によって励起されるため、 海上風の方向と波浪の最大発達方向とはほぼ一 致する。海洋レーダで観測される正と負の一次 散乱エコーはレーダに近づく波とレーダから遠 ざかる波にそれぞれ対応しており、一次散乱エ コーのピーク強度は散乱に寄与する波浪の発達 度に依存するため、正と負の一次散乱エコーの ピーク強度比から海上風向の推定が可能である。 また、一次散乱エコーの周辺に現れる二次散乱 エコーと呼ばれる副次的なピークを解析するこ とにより波浪スペクトルの推定も可能である。 しかし、通常、二次散乱エコーの強度は一次散 乱エコーに比べてかなり小さいため、波浪スペ クトルの推定には信号対雑音比の非常に良いデ ータが必要である。したがって、波浪スペクト

ルの推定可能範囲は流速ベクトルの計測可能範囲に比較するとずっと小さい。

3 遠距離海洋レーダ

遠距離海洋レーダの主要諸元を表1に示す。海 洋レーダの最大観測可能距離は、海の状態、バ ックグラウンドノイズ、受信機の感度、レーダ サイトの周辺環境など様々な要因によって決定 されるが、最も支配的なのは地表波伝播損失で ある。図3はCCIR (ITU R) の報告書から写した 海上での地表波の伝播曲線である[6]。同一距離 で比較した場合、地表波伝播損失は周波数が低 いほど小さいことが分かる。例えば9.2MHzの電 波と24.5 MHzの電波を比較すると、伝播距離 200km の地点では前者の方が約30dB も伝播損失 が小さい。遠距離海洋レーダでは24.5MHz帯短 波海洋レーダより低い周波数帯 (9.2MHz) を最大 出力 1kW で送信することにより陸上から 200km 沖合の流れの計測を可能とした。日本国内では 短波帯において十分広く連続した周波数帯域を

表 1 遠距離海洋レーダの主要諸元

レーダ方式 FMICW 周波数 9.2 MHz 掃引帯域幅 22 kHz

送信電力 1 kW(ピーク)、500 W(平均)

 距離分解能
 7.0 km

 流速分解能
 2.5 cm/s

 角度分解能
 8 °

送信アンテナ形式 3極八木アンテナ

受信アンテナ形式 2極八木アンテナの16素子リニアアレイ

DBF (Digital Beam Forming)

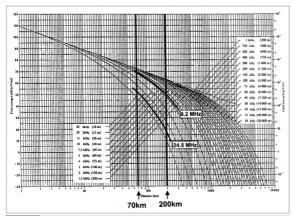


図3 海上における地表波の伝播曲線[6]

占有することがほとんど不可能なので、遠距離海洋レーダは短パルス方式のレーダに比べて周波数の有効活用が可能な送受切換え式周波数変調連続波 (FMICW) レーダ方式を採用している。周波数掃引幅は22kHzであり、距離分解能約7kmに相当する。また、信号受信の積分時間から決定される流速分解能は25cm/sである。

遠距離海洋レーダのアンテナシステムを図4に 示す。遠距離海洋レーダでは、空間配置された 複数の素子アンテナで同時受信した信号を演算 処理して角度方向情報を得るデジタルビームフ ォーミング (DBF) 方式と呼ばれる手法を採用し ている。送信アンテナには3極の八木アンテナを 使用しており、水平方向のビーム幅が120°のフ ァンビームを海面に照射する。受信には2極八木 アンテナ16基からなる全幅208.2mの巨大なリニ アアレーアンテナを用いる。16基の各素子アン テナはそれぞれ受信器とA/D変換器を備えてお り、各素子での受信信号をデジタル処理するこ とにより、アンテナ正面方向に対して±60°内の 任意の方向に仮想的なビームを形成する。水平 方向のビーム幅はアンテナ正面方向で8°以下で ある。24.5MHz帯短波海洋レーダは狭ビーム走 査方式を採用しており、全観測範囲 (90°幅)を走 査するのに2時間を要するため、観測点ごとに最 大2時間の観測時刻差が生じていた。遠距離海洋 レーダでは、DBF方式の採用により同時刻に全 観測点のデータが取得可能となった。このため、 24.5MHz帯短波海洋レーダでは不可能であった 非常に短い時間で変動するような現象の検出や 測定海域内での同時性を必要とする情報も取得 可能である。

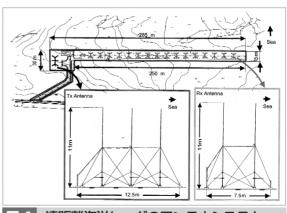


図 4 遠距離海洋レーダのアンテナシステム

図5に遠距離海洋レーダによる海流の観測範囲を示す。短波海洋レーダは流速ベクトルを求めるために複数台を組み合わせて使用する必要があるため、遠距離海洋レーダでは沖縄県の石垣島と与那国島の2か所にレーダを設置した。各レーダは半径200km、角度120°の扇形の範囲についてレーダ視線方向の速度成分を計測可能な範囲は、二つの扇形が重なった部分である。このうち流速ベクトルの算出が可能な範囲は、二つの扇形が重なった部分である。この海域では黒潮の流軸が琉球列島の島々から約100kmの地点に存在するため、遠距離海洋レーダにより黒潮の流速場の観測が十分に可能である。流速ベクトルを合成する際の誤差の大きさを表す因子1/|sin(a)|の値は、観測範囲の東端、西端、南端のごく一部を除いて20以下である。

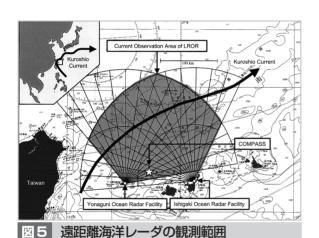


図6に遠距離海洋レーダシステムのブロック図を示す。遠距離海洋レーダ石垣島局(図7)、与那国島局(図8)の各レーダサイトと沖縄亜熱帯計測技術センターは専用線でネットワーク接続されており、沖縄亜熱帯計測技術センターから各レ

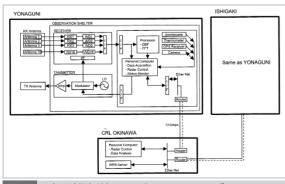


図 6 遠距離海洋レーダシステムのブロック図



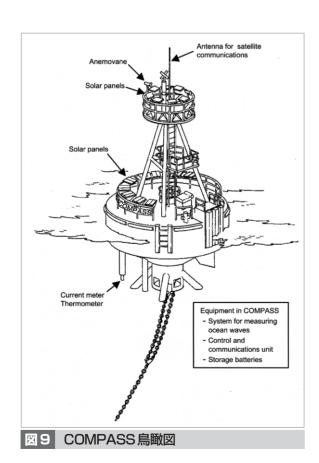
図7 遠距離海洋レーダ石垣島局



図8 遠距離海洋レーダ与那国島局

ーダの制御が可能である。通常の観測モードで は、各レーダで取得された生データは各レーダ サイトで一次処理され、ビーム方向8°ごとの16 組のドップラースペクトルデータに変換される。 両サイトで計32組のドップラースペクトルデー タは自動的に沖縄亜熱帯計測技術センターに転 送された後、同センターにて準リアルタイムで 自動的に視線方向流速及び流速ベクトルが算出 される。遠距離海洋レーダにおいて、石垣、与 那国の両レーダ間の観測時刻及び観測点は必ず しも一致しないので、流速ベクトルを算出する 際には時刻補間と空間補間を行って、同時刻の 同一観測点におけるデータセットを用意する必 要がある。そこで、まずドップラースペクトル データからレーダごとに導出された視線方向流 速データに対して線形補間による内挿を行い、 データ取得時刻の等しい視線方向流速データセ ットを作成する。次に一方のレーダの観測点上 における他方のレーダの視線方向流速値を線形補間により算出し、同一観測点上のデータセットを作成した後、ベクトル合成を行う。さらに、このようにして得られた流速ベクトルを実用上便利な7km間隔の格子上のデータに変換して出力している。通常は石垣と与那国のレーダ間での干渉を避ける必要性から、30分間ずつ時間をずらして交互に観測を行うため、流速ベクトルは1時間ごとに算出される。

図9は2001年3月に図5に星印で示された位置 (東経123°26′54″、北緯24°37′55″)に投入され た海洋観測用大型係留ブイ(CRL Ocean Monitoring Platform in Sakishima: COMPASS)の鳥瞰図 である。浮体直径は約9m、排水量は約100t、海 面から最上部までの高さは約10mである。最上 部に取り付けた風向風速計(コーナシステム KDC-S4)で海上風の計測、水温計付ドップラー 式単層流向流速計(Sontek ARGONAUT-MD)で 水面下4m層の水温と流向流速の計測、浮体内部 の機器室に設置した動揺計(Seatex MRU)で波浪 計測を行う。各計測データは、オーブコム衛星 通信サービス及び衛星船舶電話を利用して、沖

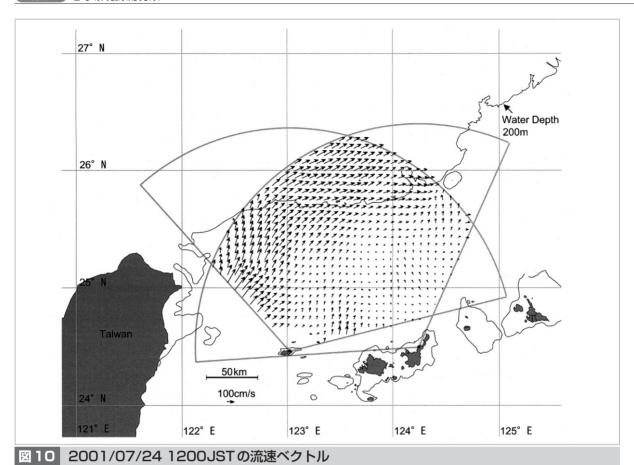


縄亜熱帯計測技術センターに自動的に転送される。COMPASS上での各種計測データは、遠距離海洋レーダにより計測される各物理量の信頼性を検証するために用いられる。COMPASS係留位置における $1/|\sin(\alpha)|$ の値は 1.8 である。

4 初期観測結果

図10は2001年7月24日の12:00に計測された流速ベクトル図である。観測域の南西部から流入した黒潮が大陸棚付近で東に向きを変える様子が表れている。計測された最も速い流速値は、200cm/sを超えている。この観測例のように、昼間は各レーダから200km以上離れた海域からの一次散乱エコーが受信できるため、十分遠方までの流れ計測が可能である。しかし、夜間は一次散乱エコーが検出可能な範囲が極端に減少し、観測可能距離が100kmに満たない場合すら存在する。この夜間に特徴的な観測範囲の縮小は電離層の影響によるが、更に検討が必要である。

図11に示した流速ベクトル図は2001年9月16 日の09:30 に計測されたもので、台風16号が遠距 離海洋レーダの観測域を通過している正にその 時刻のものである。沖縄県宮古島付近で発生し た台風16号は、沖縄本島の西方に記録的長期間 にわたり停滞して沖縄本島とその周辺の離島に 甚大な被害を与えた後、南下するという極めて 不規則な動きをした台風で、9月15日の夜から9 月16日の夕方にかけて遠距離海洋レーダの観測 域を北東から南西に通過した。図11の左上部の 囲みに、9月16日午前9時時点の台風の目の位置 を×印で示した。気象庁の発表によると、この 時刻の台風の中心気圧は970hPa、中心付近の最 大風速は35m/sである。遠距離海洋レーダの観 測域の北西部に、台風の強風により引き起こさ れたと思われる渦状の非常に速い流れが見られ る。台風の影響のない場合の流速場を考慮する と、渦状流の正味の速さは概算で100~150cm/s 程度であり、台風の中心付近の最大風速と比較 すると2.8~4.3%になる。一般に吹送流の流速は 最大で風速の3%程度と言われるので、計測値は ほぼ妥当な範囲内といえるであろう。9月16日の 午前7時頃から午後4時頃までの間、この渦状流 が徐々に南西に動いていく様子が遠距離海洋レ



27° N

Water Depth 200m

26° N

Taiwan

100cm/s

121° E

122° E

123° E

124° E

125° E

ーダによって観測された。

5 まとめ

通信総合研究所は、陸上から200km沖合まで表層流が計測できる遠距離海洋レーダシステムを開発し、2001年7月より東シナ海南部の黒潮上

流域における実験観測を開始した。

今後は、東シナ海に投入した大型係留ブイ "COMPASS" における計測データ等を参照して、遠距離海洋レーダにより計測される各物理量の信頼性を検証するとともに、東シナ海における 黒潮の流速場を長期連続観測する予定である。

参考文献

- 1 D. D. Crombie, "Doppler spectrum of sea echo at 13.56Mc/s," Nature, 1955, Vol.175, 681-682.
- **2** D. E. Barrick, "First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1972, Vol. AP-20, 2-10.
- **3** D.E. Barrick, J.M. Headrick, R.W. Bogle, and D.D. Crombie, "Sea backscatter at HF: Interpretation and utilization of the echo," Proc. Of IEEE, 1974, Vol. 62, 673-680.
- **4** R.H. Stewart, and J.W. Joy "HF radio measurements of surface currents," Deep-Sea Res., 1974, Vol. 21, 1039-1049.
- **5** A. Nadai, H. Kuroiwa, M. Mizutori, and S. Sakai, "Measurement of ocean surface currents by the CRL HF ocean radar of FMCW type. Part 2. current vector", J. Oceanogr., 1999, Vol. 55, pp. 13-30.
- **6** CCIR, "Propagation in non-ionized media. Recommendation 386-5: Ground-wave propagation curves for frequencies between 10kHz and 30MHz," Recommendations and reports of the CCIR, 1986, Vol. V.

佐藤健治

電磁波計測部門亜熱帯環境計測グルー プ主任研究員 レーダリモートセンシング



松岡建志

電磁波計測部門亜熱帯環境計測グループ研究員 博士(工学) 電波リモートセンシング、雪氷学



膝升省史 電磁波計測部門亜熱帯環境計測グルー プリーダー 博士(工学) レーダー信号処理