

海洋短波レーダーによる海流観測データの検証†

木下秀樹 , 寄高博行 , 高芝利博 , 伊藤友孝

Validation of Ocean Current Observation with High-Frequency Radar

Hideki KINOSHITA , Hiroyuki YORITAKA , Toshihiro TAKASHIBA and Tomotaka ITO

Abstract

Japan Coast Guard has started real time sea surface current observation with High-Frequency (HF) radar in the area between Hachijo-jima Island and Nojima-saki Cove from August, 2001. In this paper, to understand the characteristics and quality of HF radar data, some comparisons are carried out. Radial current speed data measured at each radar site are compared with the current data observed with shipboard ADCP and moored ADCP, and the geostrophic current from sea level difference between Miyake-jima Island and Kozu-shima Island. As a result, it is shown that the residual error between the surface current speed with HF radar and current speed at 10m depth with ADCP is about 30 cm/s, and that the residual error between the surface current speed with HF radar averaged in 25 hours and the geostrophic current speed calculated from sea level difference averaged in 25 hours is 16.6 cm/s. In conclusion, HF radar observation in the area between Hachijo-jima Island and Nojima-saki Cove is available to monitor the Kuroshio Current as for daily averaged.

1. はじめに

海洋短波レーダー(以下、「短波レーダー」という.)は、陸上に設置されたレーダー局から海に向かって短波帯の電波を発射し、海面の波による後方散乱を受信、周波数解析することによって表層の海流や、波浪等のデータを広範囲にかつ連続的に観測する装置である。海上保安庁は、八丈島 - 野島埼間約 200km 四方の海域における海流モニタリングのために短波レーダー・システムを導入し、2001 年 8 月、観測を開始した。導入した短

波レーダーの主要目は、第 1 表のとおりである。送受信局の設置状況については、伊藤(2002)に記述されている。送受信局の設置位置及び観測範囲は Fig.1 のとおりであり、2 つの送受信局の観測範囲が重なる海域で、各送受信局によって計測される視線方向流速のベクトル合成により海流観測値を得ることができる。Fig.2 に合成された海流ベクトル図の一例を示す。

短波レーダーの海洋波浪による後方散乱の原理は、Crombie (1955)によって発見され、1970 年代に、米国のグループによって複数のレーダー・

† Received December 22, 2003; Accepted March 16, 2004

Table 1 Specification of the HF radar.

manufacturer	CODAR Ocean Sensors
frequency	5 MHz
sweep width	15 kHz
coverage	200 km
spatial resolution	10 km
time resolution	0.5 hour
data processing interval	3 hour
power	50 W
receiving antenna	vertical monopole (2.5 m) and horizontal 2 crossed loops (2.5m)
transmitting antenna	1 monopole (14.5m)

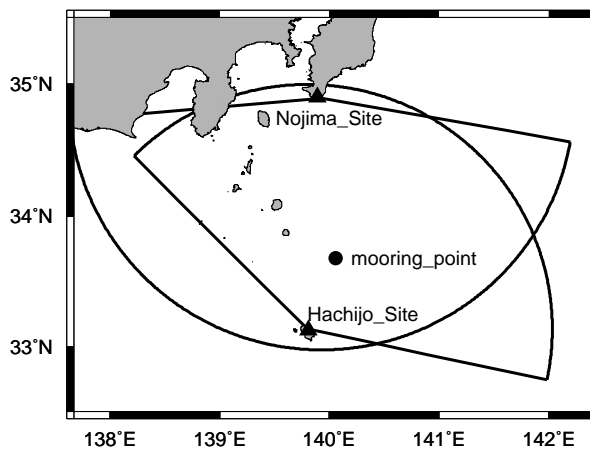


Fig. 1 Map of observation site. Solid triangles indicate locations of HF radar remote sites. Coverage of each radar site is shown as a sector form. Solid circle indicates a mooring point of ADCP.

サイトにおける視線方向流速の合成による海流測定方法として確立された (Barrick et al., 1977) . その後 Lipa and Barrick (1983)は、クロスループアンテナ及びモノポールアンテナの計3素子の受信アンテナによる受信信号から、視線方向流速を計算する手法を開発した。視線方向流速の計測では、アンテナから散乱体(海面)までの距離、方位、散乱体の移動速度を決定しなければならない。方位の決定について、従来多く使用されてきたフェイズドアレイアンテナ方式では、狭ビーム電波を走査することにより、特定方位の反射波を受信、視線方向流速を決定している。Lipa and Barrick (1983)の手法では、全方位へ送信し、全方位からの受信信号を後処理するによって方位を計算、分

MergedSST_&_TotalVector_2003-10-19_1200

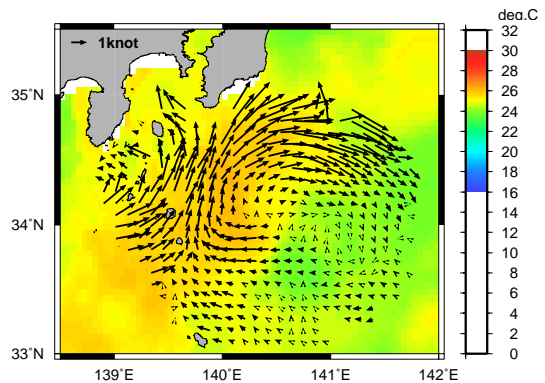


Fig. 2 An example of current vector map by HF radar with sea surface temperature by satellites. Spatial resolution is about 10 km

離している。すなわち、視線方向流速の大きさについては、Bragg 散乱による一次散乱ピークのドップラー-遷移量から計測するが、当該計測値の方位は、各アンテナ素子の受信スペクトル強度比をクロスループアンテナが形成するアンテナパターンへ当てはめることによって決定している。なお、受信信号の遅延時間から決定する散乱体までの距離は、周波数変調した連続波を送受信することで、受信信号と送信信号の周波数差から決定することができる。

海上保安庁が導入した短波レーダーは、Lipa and Barrick (1983)の原理による米国 Codar 社の製品である。Codar 社の製品は、必要とするアンテナ設置面積が比較的狭くて良いため、従来、多く使用されてきたフェイズドアレイアンテナによる短波レーダー観測の大きな障害の一つであったアンテナ設置場所の確保という問題に一つの解決策を提示した。しかし、一方では、設置場所周囲の条件によっては、受信アンテナが形成するアンテナパターンに歪みを生じることがあるため、結果として得られる視線方向流速の位置(方位)に誤差を生じやすいという欠点がある。

本研究では、短波レーダーによる観測データの精度検証のために海上保安庁が2001年から2003年までに実施した測量船による ADCP 観測、係留

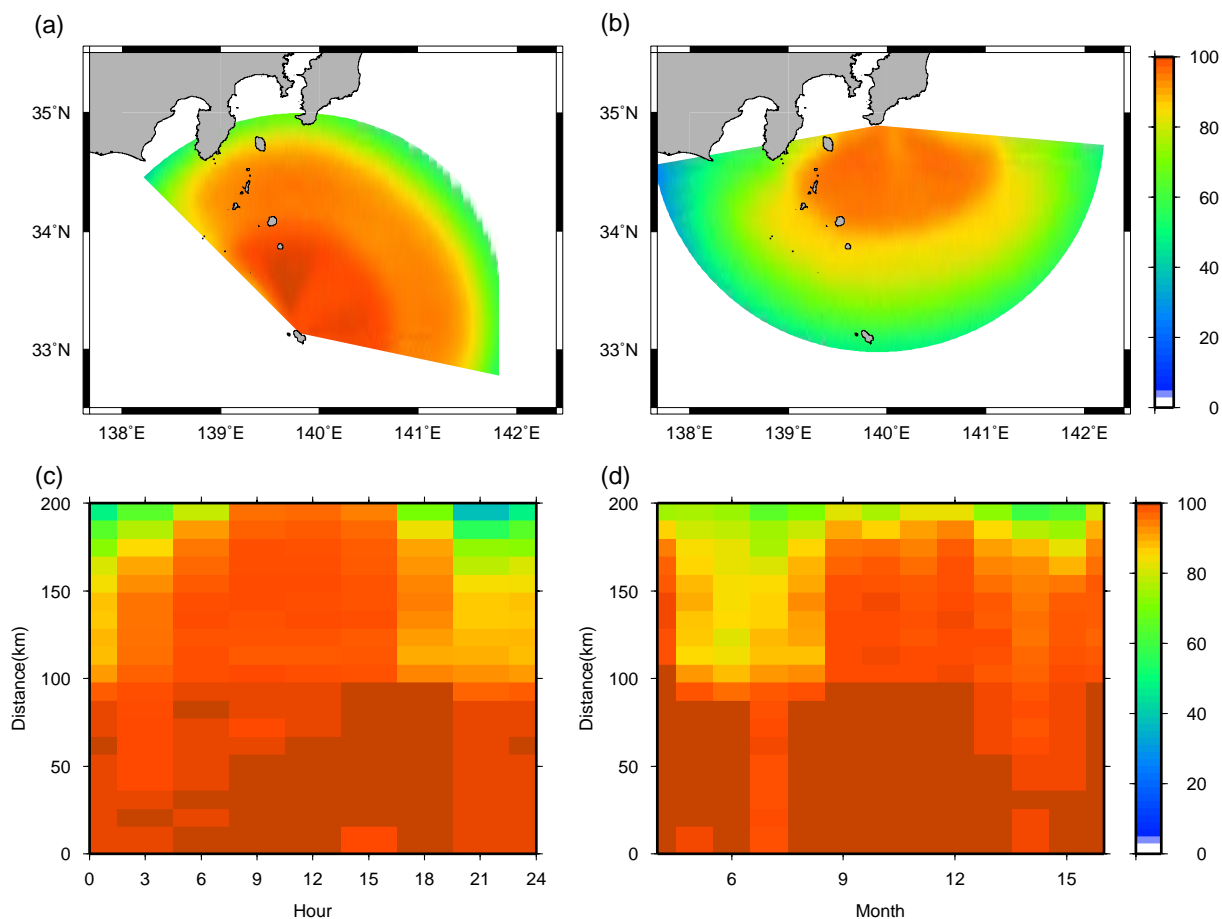


Fig. 3 Map of acquisition rate of radial speed measurement by each remote site during FY2002. (a) Hachijo site. (b) Nojima site. (c) Hourly acquisition rate at Hachijo site. (d) Monthly acquisition rate at Hachijo site.

ADCP 観測等による測定結果と各送受信局が測定している視線方向流速を比較する等の方法によって、海洋短波レーダーによる海流測定結果の特性を明らかにすることを目的としている。

2. 各送受信局におけるデータの取得状況

(1) 各送受信局の測定データ

各送受信局では、30分に1回、視線方向流速を計測している。測定データの距離分解能は10.24kmであり、方位分解能は5度である。視線方向流速の各測定点は、測定セルと呼ぶこととする。本システムでは、3時間毎に6個の測定データの平均及び標準偏差(RMS)を出力している。

以下、本項では、各送受信局で3時間毎に出力

される測定セルまでの距離、方位、視線方向流速、RMSを利用して、測定値を統計的に処理することによって、観測海域の特性及び測定データの取得状況について論じる。解析の期間は、2002年4月から2003年3月までとした。各送受信局からの方位について、北を起点、時計回りを正として、八丈島局については-45度~102度、野島崎局については95度~260度の測定データを対象とした。

(2) データ取得率

短波レーダーによる測定では、周囲の電波環境によっては、受信信号強度に対してバックグラウンドノイズが大きくなるなどして、測定セルの位置によっては出力データが得られない場合もある。2002年4月から2003年3月について、各測定セ

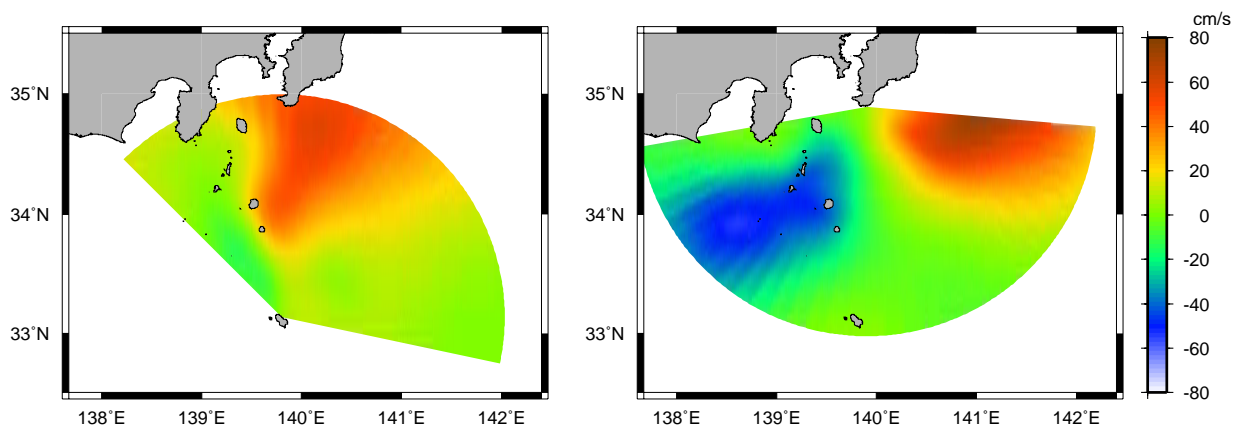


Fig. 4 Map of yearly averaged radial speed by each remote site during FY2002. Left: Hachijo site. Right: Nojima site.

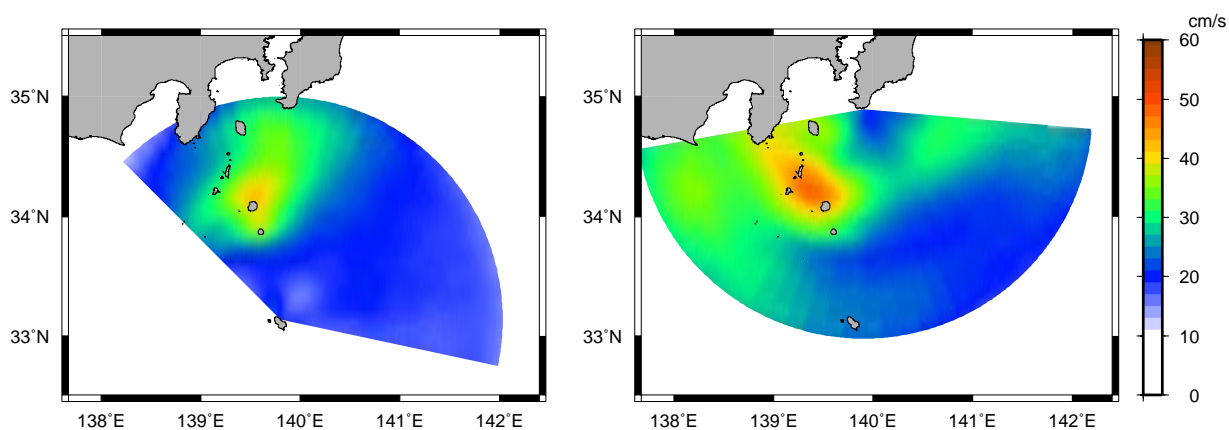


Fig. 5 Map of yearly averaged root mean square (RMS) of radial speed measurements in 3 hours at each remote site. Left: Hachijo site. Right: Nojima site.

ルで平均視線方向流速が測定された割合を百分率で表したものを Fig.3 に示す。八丈島局では、約 180km までの範囲で 80%のデータ取得率が確保されていたのに対して、野島崎局では、80%のデータ取得率を確保できたのは約 120km までであった。八丈島局におけるデータ取得率は、時間帯別にみると夜間に、月別では 5~7 月に低くなっていた。

遠方で取得率が低下するのは、電波の伝搬経路が長くなることによる信号の減衰に起因すると考えられる。また、上空の電離層反射は、夜間や夏季の日中に混信を増加させることが知られている。夜間及び 5~7 月の取得率の低下は、電離層反射

が主要因と考えられる。2つの送受信局で 80%取得率が確保された距離が異なるのは、電波の受信方位の違いによる混信量の違いや設置環境の違いが影響していると考えられる。

(3) 平均流速

各測定セルにおける平均視線方向流速を Fig.4 に示す。八丈島局の測定では局から遠ざかる方向の視線方向流速が房総半島沖を中心として観測された。一方、野島崎局では、八丈島局と野島崎局を結ぶ線の西で主に局に近づく方向、東で主に局から遠ざかる方向の視線流速成分が卓越していた。これは、解析期間中にわたり黒潮の流路は非大蛇行接岸流路で比較的安定していたことと整合する。

(4) 平均 RMS

各測定セルにおける3時間内 RMS の1年平均の分布を Fig.5 に示す。八丈島局の RMS 分布について、八丈島から見て御蔵島及び三宅島の後方に RMS 極大が広がっている。一方、野島崎局の RMS 分布では、三宅島と新島の間には顕著な極大が存在し八丈島局による観測の RMS 極大が分布する海域とほぼ一致している。ただし、月毎の RMS 分布によれば、八丈島西側の海域等1年平均とは異なる海域に極大が見られることもある。

RMS が大きくなる原因としては、受信信号にノイズが多く測定毎の精度が十分ではないこと、平均操作を行う3時間内の流れの変化が激しいことが挙げられる。測定原理から受信信号のホワイトノイズは特定方位のデータのみではなく、特に等距離のデータに影響を与えると考えられることから、後者の理由が有力と考えられる。

3. 観測データの検証

(1) 船舶搭載 ADCP データとの比較

短波レーダー観測の検証のための測量船による海流観測は、2001年9月、12月、2002年7月、2003年4月の合計4回実施されている。ADCP による10m 深流速を短波レーダー各送受信局の測定セル内視線方向に射影したものを短波レーダー測定セル毎に平均し、送受信局で測定した視線流速との比較を行った結果を Fig.6 に示す。2003年4月に実施した観測は、観測海域に偏りがあり、特に八丈島局との比較結果が極めて悪い。ADCP 観測結果を真値とした場合の平均二乗誤差は、2003年4月の観測を除いた3回の観測をあわせると、八丈島局で37.6cm/s、野島崎局で35.6cm/s である。測量船は一つの測定セル内を数十分で直線的に通過するため、ADCP データと短波レーダー・データとは、取得データの時間、空間及び深度の代表性は必ずしも同じではないが、両者の相違は概ね30cm/s 台と見積もることができる。

(2) 潮位差との比較

短波レーダーの観測対象海域のうち、神津島と

三宅島には験潮所が設置されており、2島を結ぶ線は野島崎からの視線方向にほぼ直交していることから、神津島と三宅島の潮位差から算出した地衡流と2島間における野島崎局の視線方向流速計測値(4点の平均)を比較した。験潮所の位置と野島崎局からの計測セルの中心位置を示した図及び双方のデータに25時間移動平均を施して比較した結果を Fig.7 に示す。両者の相関係数は0.70、両者の差の標準偏差は16.6cm/s であり、潮流等の短周期変動成分を除いた比較では、短波レーダーによる流速は潮位差による地衡流とよく一致している。

(3) 係留 ADCP による定点時系列観測との比較

短波レーダーの時系列データの検証を目的として、2003年6月19日から8月5日まで、北緯33度40.6分、東経140度03.7分(Fig.1丸印)深度約100mの地点にRD社製WorkHorse ADCP を設置し、表層から水深約100mまでの海流の連続観測を行った。測定は鉛直5m間隔、時間間隔は20分とした。設置点の水深は約350mであり、観測データの時系列によれば、潮流によるものと考えられる1日周期の変動が卓越している。

短波レーダー視線方向流速との比較のために、ADCP 観測データは、水深約10mの流速を抽出し、3時間間隔で3時間平均した後、2つの送受信局からの視線方向成分を計算した。短波レーダー・データと比較した結果を Fig.8 に示す。ADCP による測定結果を真値とした場合、短波レーダー視線方向流速の平均二乗誤差は概ね30cm/s である。

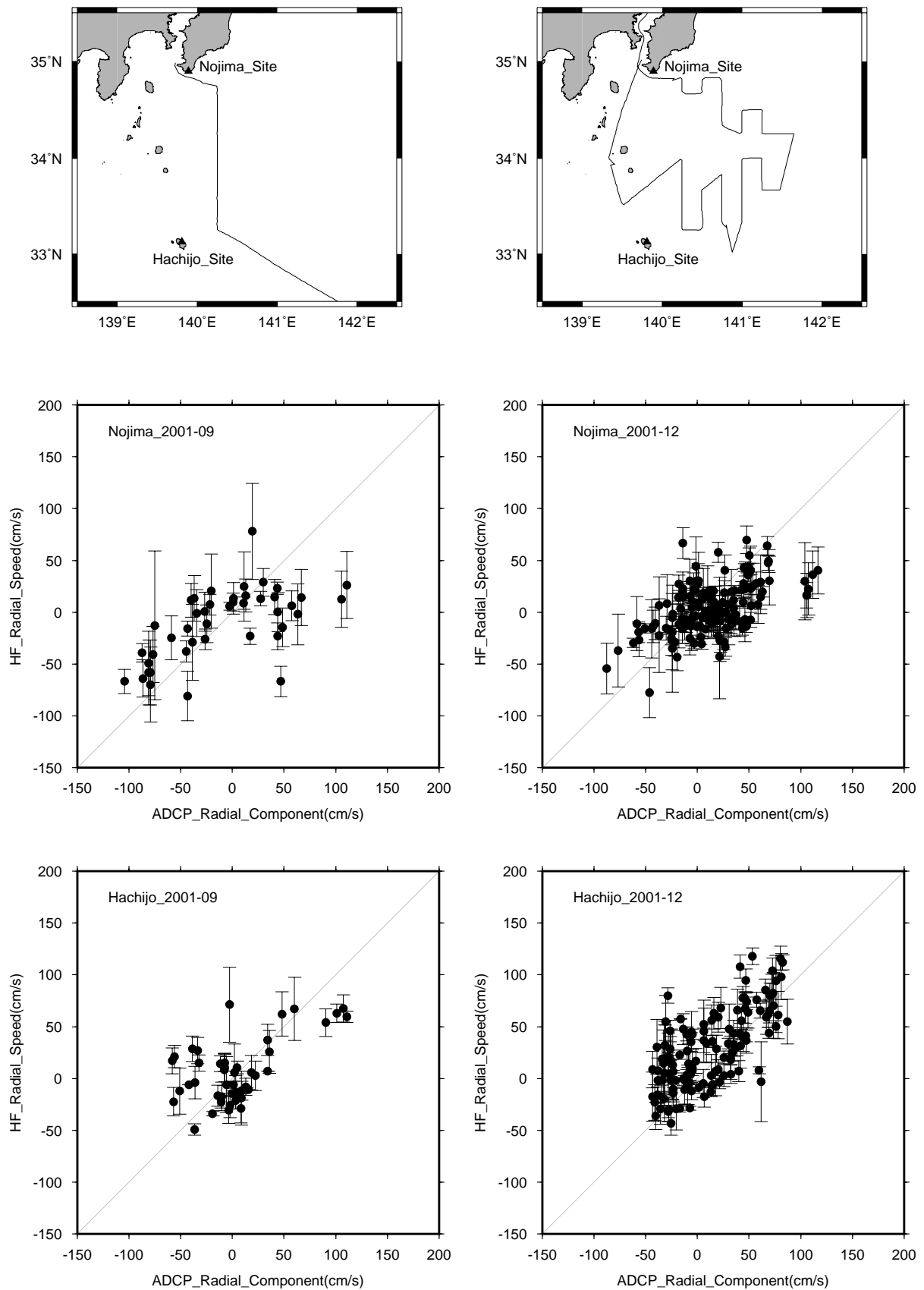


Fig. 6 Results of comparison between radial velocity by HF radar and radial component of velocity at 10m in depth by shipboard ADCP. Top: Cruise Track, Middle: Scatter plots of the radial velocity at HF radar Nojima site (vertical axis) and the ADCP velocity (horizontal axis), Bottom: Scatter plots of the radial velocity at HF radar Hachijo site and the ADCP velocity. Left: September, 2001, Right: December, 2001. Vertical bars in scatter plots are indicate RMS of radial velocity measurement by HF radar.

Validation of Ocean Current Observation with High-Frequency Radar

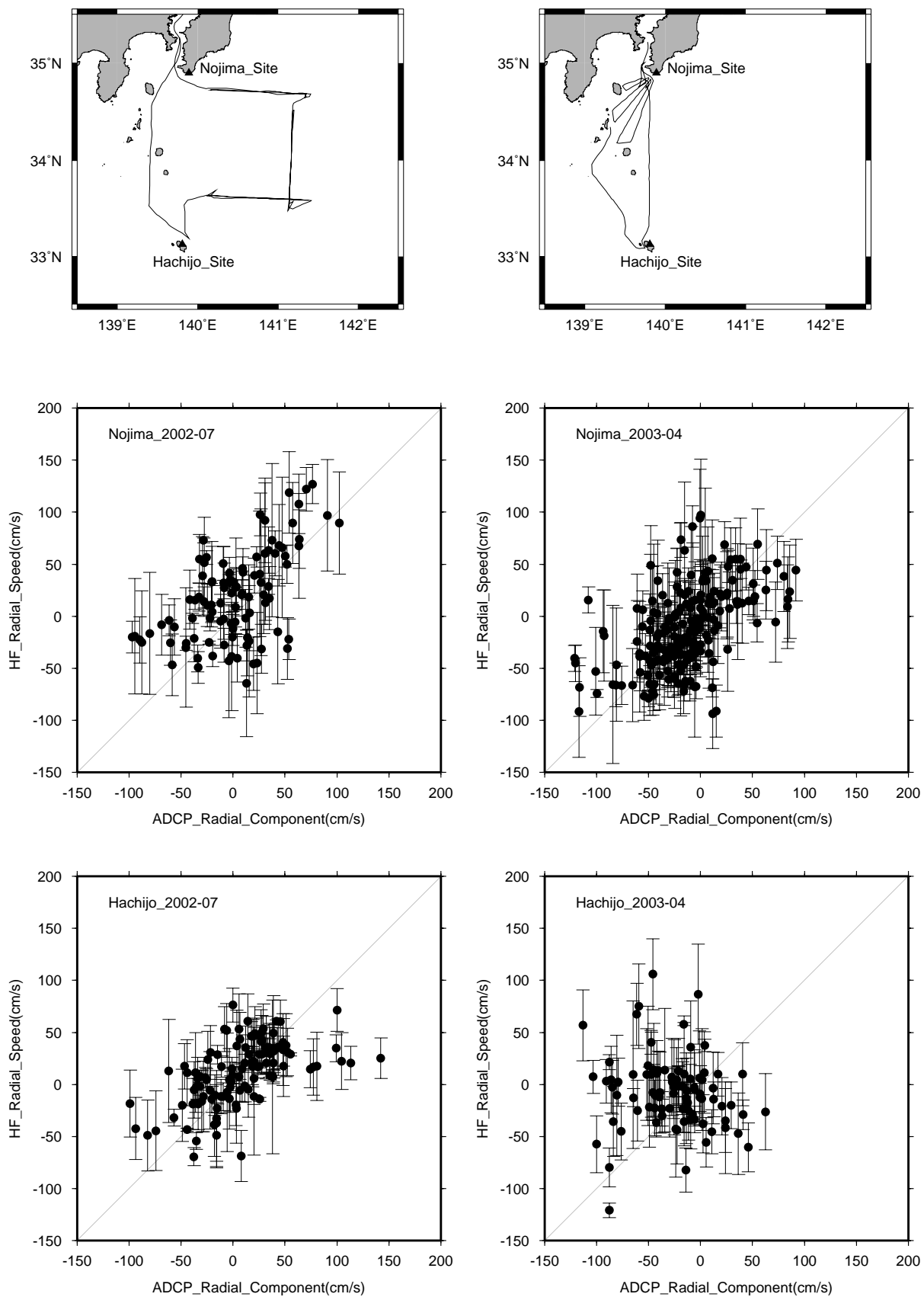


Fig. 6 Continued. Left: July, 2002, Right: April, 2003.

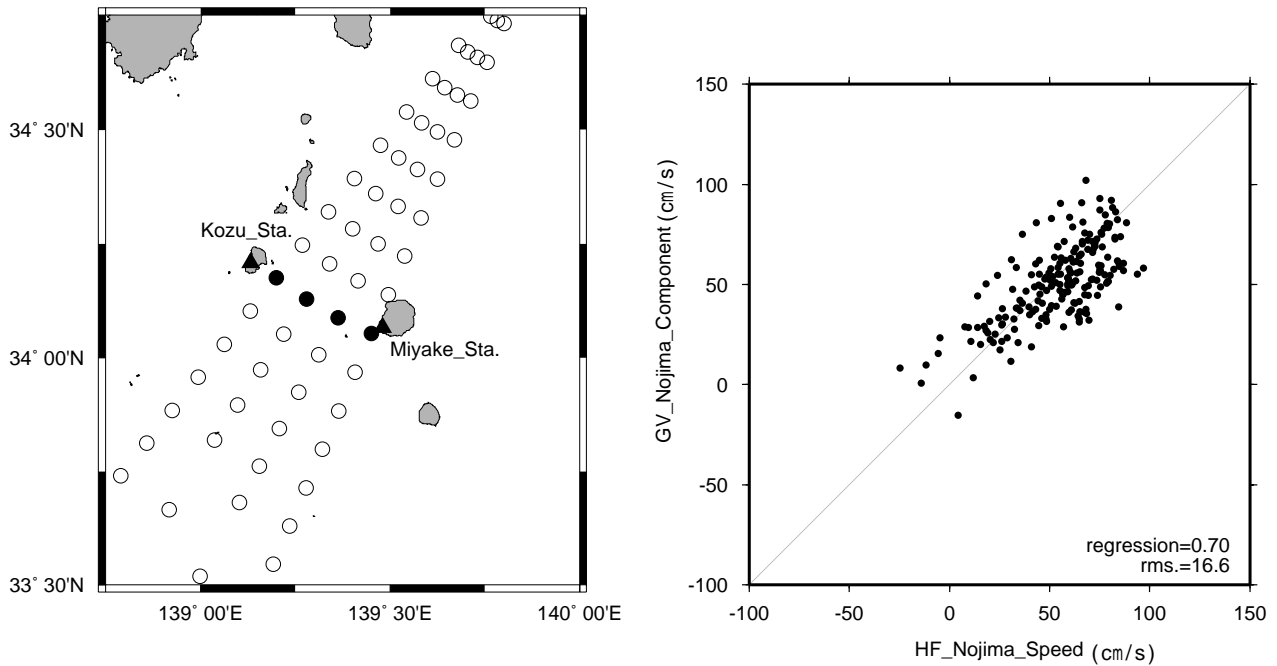


Fig. 7 A result of comparison between radial velocity by HF radar at Nojima remote site and geostrophic velocity calculated from sea level difference between Miyake tide station and Kozu tide station. Left: Location map. Triangles indicate tide stations. Circles indicate observation cells by HF radar Nojima site. Radial velocities of HF radar are averaged among solid circle cells. Right: Scatter plots of the radial velocity at HF radar Nojima site (horizontal axis) and the geostrophic velocity (vertical axis).

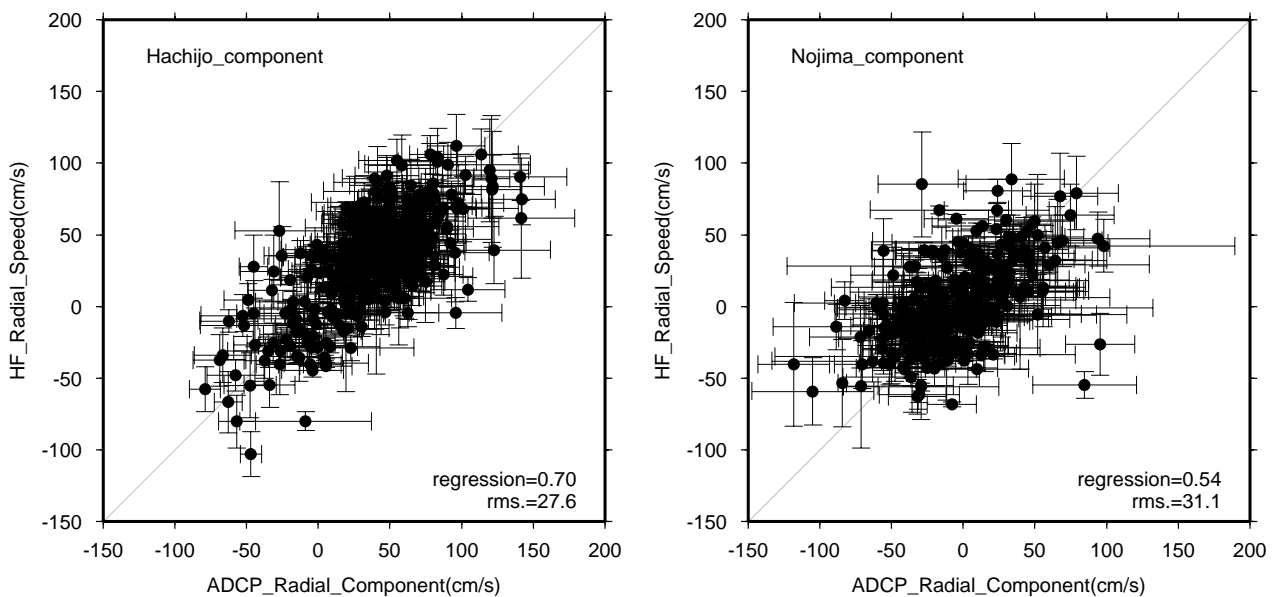


Fig. 8 A result of comparison between radial current velocity by HF radar and radial component of current velocity at 10m in depth by ADCP mooring observation. Each radial component of ADCP velocity is averaged in 3hours. Vertical bars indicate RMS of radial velocity measurements by HF radar. Horizontal bars indicate standard deviations of averaged velocity by ADCP. Left: Hachijo Site. Right: Nojima Site.

4. まとめ

2001年8月に八丈島-野島崎間で開始した海洋短波レーダーによる海流観測データについて、その観測精度を検証するために実施した船舶等による海流観測結果との比較を行った。各送受信局による視線方向流速データは、電波の混信等の影響によって時間的、空間的に取得が不十分となる場合があること、三宅島周辺で3時間内RMSが大きいという問題があるものの、10m深流速との比較では、約30cm/s前後の相違であった。また、海域によっては、極端に比較結果が悪くなる場合があった。受信アンテナパターンに歪みが生じている場合、アンテナパターンを実測し、結果を視線方向流速の計算に反映することで、測定精度が改善すると言われている。アンテナパターンの計測による精度向上は、今後の課題である。

八丈島局の潮位差から算出した地衡流との25時間平均の比較では、両者の差の標準偏差が16.6cm/sと良い一致を示したことから、今回対象とした海洋短波レーダーによる海流観測は、現状でも、日平均値を使用することによって、黒潮等の比較的強い海流の日々の変化を追うことは十分可能であると考えられる。海洋短波レーダーは、従来の船舶による観測と比較して、時間的にも空間的にも飛躍的に高密度の観測を可能とするものであり、観測データの特徴及び特性を十分に理解することにより、今後の海洋モニタリングに活用することが期待できる。

謝辞

本研究で使用した海洋短波レーダーの無線免許は、加藤弘紀氏、並木正治氏及び朝日航洋株式会社の電気通信監理局との長く粘り強い交渉の結果、取得できたものである。比較のための観測は、「拓洋」、「天洋」、「海洋」各測量船によって行われた。ここに記して関係各位に感謝する。

要旨

海上保安庁は、八丈島-野島崎間の海域におけ

る海洋短波レーダーによるリアルタイム表層海流観測を2001年8月に開始した。本研究では、短波レーダー・データの特性を理解するために、2つの送受信局で測定した視線方向流速と、船舶搭載 ADCP、係留 ADCP による海流データ及び三宅島-神津島間の潮位差から計算した地衡流との比較を行った。その結果、短波レーダーで計測した表層流速は、10m深における ADCP 観測データと約30cm/sの相違があった。25時間平均した潮位差から計算した地衡流とは16.6cm/sの残差であった。その結果、八丈島-野島崎間の短波レーダー観測は、日平均に関する限り、黒潮のモニタリングに有効である。

参考文献

- Barrick, D. E., M. W. Evans and B. L. Weber : Ocean surface currents mapped by radar., *Science*, **198**(4313), 138-144, (1977).
- Crombie, D. D. : Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s., *Nature*, **175**(4459), 681-682, (1955).
- 伊藤友孝：海洋短波レーダーによる表層流観測，*海洋調査技術*，**14**(1), 33-36, (2002).
- Lipa, B. J. and D. E. Barrick : Least-squares method for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data; Application at ARSLOE, *IEEE J. Oceanic Eng., OE* **8**, 226-253, (1983).

