131 短波海洋レーダによる 海面流速分布の測定

鹿児島大学水産学部 市川 洋^o、森 博明
郵政省通信総合研究所沖縄電波観測所 灘井 章嗣
郵政省通信総合研究所地球環境計測部 大野 裕一

Measurement of Sea Surface Current Field Using HF Ocean Radar

Hiroshi ICHIKAWA*, Hiroaki MORI*, Akitsugu NADAI** and Yuichi OHNO***

In order to elucidate the maintenance mechanism of abrupt large change of temperature and salinity across the Kuroshio front, measurements of sea surface current field and its temporal change were made in the sea south of the Yakushima Island from October 9 to December 7, 1992, using the HF ocean Radar system, developed at the Okinawa Radio Wave Observatory, CRL. From 10-minute mean line-of-sight component of currents measured by two independently scanning HF Radars located 10 km apart to each other at the coast of Yakushima Island, we have estimated horizontal current vectors hourly at grided points of 2 km interval in 50 x 20 km area. The horizontal divergence was found to have positive and negative maximum values alternately along the front rather than a narrow convergence zone along the front.

1. はじめに

水温・塩分が大きく異なる2つの水塊が相接するフロント（海洋前線）域において、拡散・混合過程による水温・塩分の水平勾配の減少と、異なる2水塊の各々が表層で境界へ向かって運ばれる水平収束過程による水平勾配の強化とが互いに釣り合っている場合に、フロントは維持される¹⁾。河川水の流出に伴って河口域に発達する密度流フロントや風成エクマン収束に伴う大規模フロント付近の水平収束流の駆動機構についてはかなり解明されている²⁾。しかし、沿岸水と黒潮系外洋水との境界に発達する黒潮フロントについては、黒潮流速の水平シアに伴う鉛直2次循環流あるいは黒潮の小蛇行に伴う水平渦流によって水平収束流が引き起こされるというモデルが提案されてはいるものの未だに確立されてはいない現状である。これは黒潮流軸位置の変動に伴ってフロントの位置が絶えず変動す

*Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 4-50-20, Shimoarata, Kagoshima-shi, Kagoshima

**Okinawa Radio Wave Observatory, Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications Japan, 829-3, Daigusukubaru, Aza Kuba, Nakagusukuson, Nakagamigun, Okinawa

***Global Environment Division, Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications Japan, 4-2-1, Nukuikitamachi, Koganeishi, Tokyo

るために、フロント付近の流速分布を係留系によってオイラー的に観測することが難しく、表層流速分布とその変動の実態が十分に把握されていないことによる。しかし、近年の短波海洋レーダ技術の開発によって、広域の海面流速分布を短い時間間隔で長期間測定することが可能になった。トカラ海峡における黒潮フロントの維持機構の解明を目指して、1992年10月9日～12月7日に屋久島の南部（平内）と南西部（栗生）に短波海洋レーダを設置し、屋久島南西岸から沖合い60 km までの表層流速分布の連続測定を行った。以下では、連続的に良好な流速データが取得された11月17日～23日の約5日間の資料を用いて、表層流速、水平収束・発散、および渦度の分布とその変動について解析した結果を報告する。

2. 短波海洋レーダの測定原理と仕様

陸上より海に向けて発射された電波は、海面で散乱されて一部が戻ってくる。この散乱は、電波の波長の半分の波長を持つ波浪によって生じ、一次散乱またはブラッグ散乱と呼ばれる。海洋上の波の位相速度 c は波の分散関係から $c = (g\lambda/2\pi)^{1/2}$ と決まる（ g は重力加速度、 λ は波の波長）。戻ってくる電波はこの波の位相速度に応じたドップラシフトを受け、周波数解析するとドップラスペクトル上に強い2つのピークが現れる。これらの2つのピークは、近づいてくる波によるエコー（正のドップラ）と、遠ざかる波によるエコー（負のドップラ）に対応する。波は海流に乗って移動しているため、海流によるドップラシフトも加わり、ピークの位置は波の位相速度からさらにずれる。このずれの量を Δf とすると $v = C \Delta f / (2f)$ として、海流の速度を求めることができる（ v は流速、 C は電波の速度、 f は電波の周波数）。レーダで測定できる海流はレーダビーム方向の流速成分だけなので、海流ベクトルを求めるためには離れた2台のレーダを使って異なる方向から観測する必要がある。

沖縄電波観測所で開発した短波海洋レーダの主要諸元をTable 1 に示す。このレーダの特徴の一つはレーダ方式に送受切換え型のFMCW（周波数変調連続波）方式を採用している点にある。FMCW方式は、発射電波の周波数を変えながら連続的に送信し、受信と送信の周波数差から距離を求め

るものである。さらに、本システムでは、一つのアンテナシステムを送信・受信兼用とするために、短時間で送受を切り換えて使用する方式を採用している。アンテナには10組のアンテナ素子を1列に並べてビームを形成するフェイズドアレイアンテナを用いている。ビームの向きは各素子への給電位相を変えることにより、正面から左右45度の

Table 1 Configuration of HF Ocean Radar used in the present study.

レーダ方式	送受切り換え型FMCW方式
観測周波数	24.465 ～ 24.565 MHz
周波数掃引幅	100 kHz
送信出力	100 W (平均約50 W)
距離分解能	1.5 km
アンテナ	反射器付き10列フェイズドアレイ
ビーム幅	約15度
ビーム方向	0度±45度(7.5度ごと)
偏波	垂直偏波

範囲を7.5 度ごとに13方向に振ることができる。

3. 観測および解析方法

短波海洋レーダの設置場所と観測海域及びレーダビーム方向をFig. 1に示す。今回の観測では、各ビームの測定時間を10分間として、No.0~No.11の各ビーム上の1.5 km間隔の点でビーム方向の流速成分を2時間毎に測定した。今回の観測ではレーダ設置位置から40~75kmの距離まで流速を測定することができた。2台のレーダの設置間隔は約10kmであるため、レーダビームが重なる海域は南北に約50km、東西に約20 kmとなった。短波海洋レーダでは、電波環境やレーダの不調に起因するノイズが海面波からの反射信号より強く受信された場合には、流速値に異常値が現れる。このため、各ビーム方向の流速値が連続して一定値を示している場合およびその前後の値と比べて流速値が大きく異なる場合を異常値として除去した³⁾。

異常値を取り除いた流速値から、2 km間隔の格子点上の各点での流速ベクトルを以下の方法で求めた。最初に、各ビームで2時間毎に測定された値を内挿して、正時毎の値を求めた。次に、1台のレーダからの2本のビーム上の4点での流速の各ビーム方向成分を空間的に内挿して、これらの隣接する4点によって囲まれた領域内の格子点での流速のレーダ視線方向成分を求めた。最後に、同一格子点上の2つのレーダ視線方向流速成分を合成し、流速ベクトルの大きさと向きを求めた。2つのレーダ視線方向流速成分を合成して得られた流速が異常な極値を持つ場合には、それを除去した。以上に述べた方法によって、最終的には、11月14日~23日の約10日間の表面流速ベクトルを得た。また、この流速値を用いて、水平収束・発散 Q と渦度 Z を算出した。短波海洋レーダによって測定された瞬間的な流速値に含まれる測定誤差は10 cm/s 程度であるので、 Q および Z の瞬間値に含まれる計算誤差は $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 程度である。また、短波海洋レーダによって1時間間隔で測定された25個の流速値の平均である25時間平均流速値に含まれる測定誤差は2 cm/s 程度となるので、 Q および Z の25時間平均値に含まれる計算誤差は $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 程度である。

Fig.1 Observing areas of two HF ocean Radars at Yakushima Island.

4. 結果

Fig. 2 に1992年11月19日8時を中央時刻とする25時間の平均表層流速分布を示す。沖合では150 cm/sほどの南東向きの流れで黒潮強流域となっているが、屋久島側では南南東～南向きで100 cm/s以下の流れとなっている。Fig. 3 にFig. 2 の点線で囲まれた領域における、19日8時を中央時刻とする25時間の平均水平収束・発散の分布を示す。

Fig.2 25-hour mean sea surface current vectors.

Fig.3 25-hour mean horizontal divergence.

従来は、黒潮フロント付近では収束が一様に卓越し、収束・発散の等値線は流れに沿っていると考えられていた。しかし、収束・発散の等値線はむしろ流れに直交する傾向があり、水平収束域（負）と発散域（正）が4～6 km 間隔で交互にパッチ状に存在していることが、本観測によって初めて明らかにされた。

付記：本研究は文部省科学研究費補助金一般研究C（課題番号0464021）によって行われた。

参 考 文 献

- 1) 市川 洋, 潮境の海洋構造, 水産海洋研究会25周年記念誌「21世紀の漁業と水産海洋研究」(水産海洋研究会編), 恒星社厚生閣, 1988, 266-272.
- 2) J.H. Simpson and I.D. James, Coastal and Estuarine Fronts. in "Baroclinic Processes on Continental Shelves" (ed. C.N.K. Mooers), American Geophysical Union, Washington, D.C., 1986, 63-93.
- 3) 森 博明, 黒潮前線域における水平収束・発散の分布とその変動. 鹿児島大学大学院水産学研究科修士論文, 1994, p160.