

2台の短波海洋レーダによる福島沖の流動観測

Observation of Ocean Currents in the Sea off Fukushima
with Two HF Ocean Radars

坂井伸一*・水島雅文**・黒岩博司***・灘井章嗣***

By Shin'ichi SAKAI, Masafumi MIZUTORI, Hiroshi KUROIWA and Akitsugu NADAI

The horizontal two-dimensional ocean currents in the sea surface were observed using two HF radar in the sea off Fukushima from March to April in 1993. In the far field over 4km off the coasts, the velocities derived by the HF radars were in good agreement with the field data by a velocimeter. The current variability was investigated horizontally by the current vectors, the divergence, and the rotation estimated by the HF radar.

Keywords : HF radar, horizontal current vectors, sea off Fukushima

1. はじめに

短波海洋レーダは、陸上より海面に向かって短波帯の電波を送信し、海面で散乱されてレーダに戻ってくる電波を解析することにより、海流、波高、海上風などを観測できる装置である。従来の船舶などの海洋観測に比べ、2次元的な海洋情報を天候に左右されず、短時間でかつ連続して観測できるといった点が優れている。短波海洋レーダの概要を、図-1(a)、(b)に示す。システムは、レーダを送受信するアンテナ部と、送信機、受信機およびパソコンなどを格納したコンテナ部とからなっている。

沖縄電波観測所では、1987年より短波海洋レーダの開発に着手し、1988年に1台目のシステムを完成させ、1989年から船舶等のデータと比較した実証観測を開始した¹⁾。1992年には2台目の短波海洋レーダを完成し、2台を使って2次元観測を行なっている²⁾。しかし、2次元観測に関しては、流速計による同期観測データなどを用いた解析精度の検証はまだ十分に行なわれていない。

本研究は、1993年3月から約1か月間にわたり、福島県浜通りにおいて実施した、2台の短波海洋レーダによる現地観測結果について、同海域において同期して行なわれた流速計による観測結果と比較検討することにより、短波海洋レーダによる海面流速の測定精度について考察するものである³⁾。

* 正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部 (〒270-11千葉県我孫子市我孫子1646)

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部 (同 上)

*** 郵政省通信総合研究所 沖縄電波観測所 (〒901-24沖縄県中頭郡中城村字久場台城原829-3)

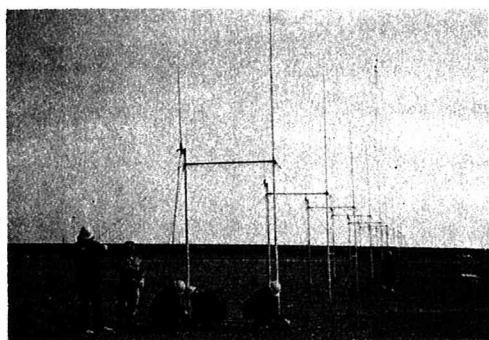


図-1(a) 短波海洋レーダ（アンテナ部）



図-1(b) 短波海洋レーダ（コンテナ部）

2. 短波海洋レーダによる海面流速の測定原理

海面に送信された短波帯の電波は、海面波によって散乱されるが、特に送信電波の1/2の波長を持ちレーダの視線方向に伝播する海面波による散乱は、ブラッグの条件を満たすため強い後方散乱を起こす。その結果、図-2に示すように、レーダ受信電波のドップラスベクトル上において正負はほぼ対称な位置に、1次散乱と呼ばれる強い2つのピークを形成する⁴⁾。

電波の波数ベクトルを k 、海の波の波数ベクトルを K とすると、共鳴散乱の条件は、 $K = \pm 2k$ で与えられる。いま、海に流れがないとすると、波数 K の波の位相速度は次式によって与えられる。ただし、 g は重力加速度、 K は波数ベクトル K の大きさを表す。

$$V = \sqrt{\frac{g}{K}}$$

共鳴散乱を起こす波の進行方向は、レーダの視線方向に平行なもののみであるから、後方散乱のドップラスベクトルを求めると、 $\pm V$ の速度に対応して、以下に示す周波数 $\pm f_{D0}$ の位置にピークが出ることになる。ただし、 $+f_{D0}$ の位置のピークはレーダに近づく波、 $-f_{D0}$ の位置のピークはレーダから遠ざかる波によるものである。

$$\pm f_{D0} = \pm \frac{\sqrt{Kg}}{2\pi}$$

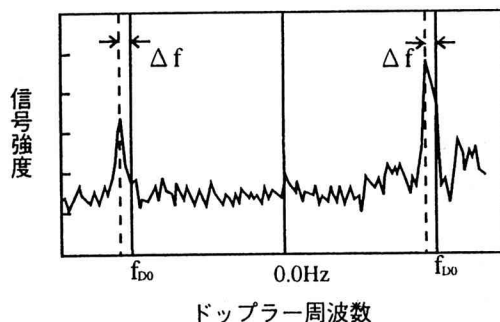


図-2 短波海洋レーダ観測によるドップラスベクトル

実際に得られるドップラスベクトルは、図-2に示すように、2つのピークは正負とも $\pm f_{D0}$ から等間隔に右または左にずれている。これは、実際には海水が静止しているのではなく、レーダ方向にある速度をもって動いているためである。従って、この1次散乱のピークのずれ Δf を測ることにより、次式により海流のレーダ視線方向の速度を求めることができる。ただし、 c は光速、 f はレーダの周波数である。

$$v = c \frac{\Delta f}{2f}$$

3. 福島沖における海面流速の観測

3.1 短波海洋レーダによる観測

1993年3月8日から4月3日までの期間、2台の短波海洋レーダを、図-3中に○で示すSt.r1とSt.r2にそれぞれ

設置し、両レーダによってはさまれる海域を中心に海面流速の観測を行なった。この間には制御用計算機の不調などの原因で欠測期間もあったため、今回の解析にあたっては、良好なデータが連続して観測された3月18日から4月2日までの16日間のデータのみを対象とした。

短波海洋レーダの主要諸元を表-1に示す。レーダは、時間的に送信と受信を切り替えるFMICW(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave)方式で、10列のアレイアンテナにより15°のビーム幅を作っており、レーダ正面方向から左右45°まで7.5°刻みで方向を変えて観測できる。今回の観測では、図-3に示したように、St.r1のレーダは北東方向に正面を向け、St.r2のレーダは南東方向に正面を向けて設置し、7.5°刻みに12方向の観測を行なった。

観測では、24.465MHzから24.565MHzまでの100kHzの掃引幅を0.5秒で掃引し、1方向につき10分間の繰り返し観測を行なうため、1回の観測に2時間を要する。このとき、レーダ視線方向の距離分解能は1.5kmとなり、周波数分解能が1/128Hzであるから、海流の速度分解能は4.78cm/sとなる。

流速が鉛直方向に変化している場合には、概ね海面波の波長の1/(2 π)倍の深さまでの平均流速が位相速度に影響を与えるため⁹⁾、短波レーダにより観測した視線方向の流速は、海面から深さ約1mまでの平均値を表している。また、短波海洋レーダによる最大探知距離は50km～80km程度であり、今回の観測においても75km付近まで良好な観測結果が得られている。

前述のように、短波海洋レーダによって観測できるのは、レーダ視線方向の海面流速成分のみであるが、2台の短波海洋レーダを用いることによって2方向の流速成分を観測できるため、2次元の流速分布を観測することが可能となる。本研究では、短波海洋レーダの観測結果の解析にあたり、2台の短波レーダによる視線方向の流速成分の値を用いて、1km×1kmの直交格子上に視線流速成分を内挿し、2次元の流速ベクトルを算出した。沖合遠方では、視線間の距離が離れ空間分解能が悪くなるため、沖合30kmまでを解析対象とした。

表-1 短波海洋レーダの主要諸元

送受信機	
レーダ方式	送受切替型 FMCW (FMICW)
観測周波数	24.465 ～ 24.565 MHz
送信出力	100W
受信機雑音指数	<25dB
受信機帯域幅	500Hz
距離分解能	1.5km
アンテナ	
アンテナ方式	反射器付短縮ホイップ10素子フェイズドアレイ
ビーム幅	15度(H面)、80度(E面)
ビームスキャン	±45度、7.5度ステップ
サイドローブ	<-15度

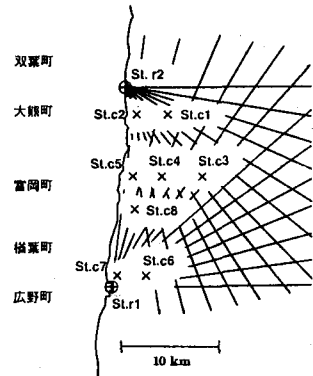


図-3 観測点位置および観測範囲

3.2 流速計による観測

短波海洋レーダの観測と同期して、係留式流速計による同海域の観測を行なった。測定点は、図-3に示したSt.c1～St.c8であり、観測層は水深2mで、15分間隔でデータを取得した。短波海洋レーダによる観測結果と比較検討するために、実測データは2時間の移動平均処理を行なった。

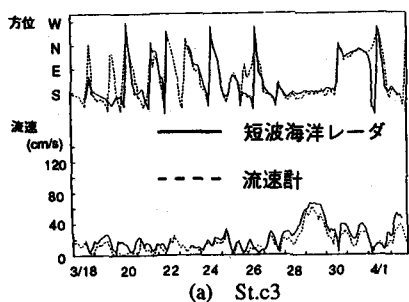
4. 観測結果

4.1 短波海洋レーダと流速計による観測結果の比較

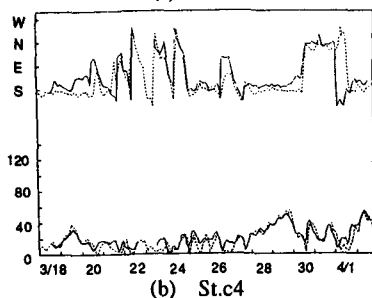
2台の短波海洋レーダから、2次元の海面流速を求める場合、2つのレーダ視線の交差角が90°のとき最も

精度よく流速を推定でき、それからずれるに従い精度が悪くなることが知られている⁹⁾。また、沿岸近傍では、送受信切り替え時のタイムラグの影響でレーダの受信感度が悪くなる。

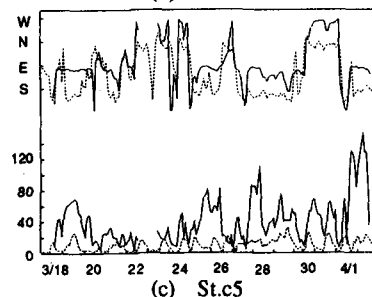
本研究では、図-3に示した流速計による測点St.c3、St.c4、およびSt.c5のデータと、それぞれに最も近い格子点における短波海洋レーダの値とを比較した。図-4(a)~(c)に、St.c3~St.c5における両データの流向・流速の時系列を、図-5(a)~(c)に、両データの相関図を示す。



(a) St.c3

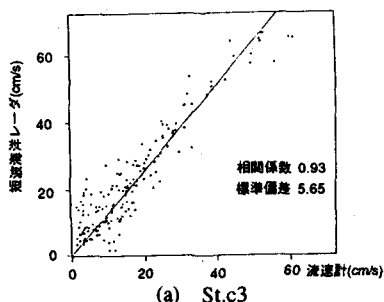


(b) St.c4

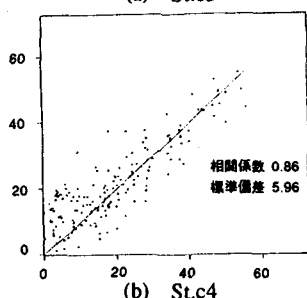


(c) St.c5

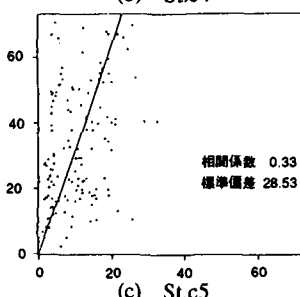
図-4 短波海洋レーダと流速計による
流向・流速の時系列データ



(a) St.c3



(b) St.c4



(c) St.c5

図-5 短波海洋レーダと流速計による
流速の相関図

図-4(a)~(c)より、流速は沖合側のSt.c3、St.c4では、ともに短波海洋レーダの値の方がやや大きな値を示しているものの、全体の変動傾向はかなりよく一致しており、流向もややずれがあるものの変動傾向はよく一致している。しかし、最も沿岸に近いSt.c5では、流速・流向とも大きく値がずれている。特に流速は、短波海洋レーダの流速値がかなり大きくなっている。

図-5(a)~(c)の相関図を見てみると、St.c3、St.c4では流速20cm/sあたりを境に、それより流速が大きくなるとほぼ直線上に分布している。また、St.c4では短波海洋レーダと流速計の値がほぼ等しいのに対し、St.c3では短波海洋レーダの方が大きな値を示す傾向がある。一方、St.c5は全体的に相関が認められない。相関係数の値はSt.c3で0.93、St.c4で0.86と高い相関を示しているが、St.c5では0.33となり、急に相関が悪くなっている。また、標準偏差の値もSt.c3で5.65、St.c4で5.96とほぼ等しいのに対し、St.c5では28.53となっ

ている。

St.c5で相関が悪くなる原因としては、前述のような送受信間の時間間隔が短いための受信感度の低下が挙げられるが、2台のレーダ視線の交差角が 165° と、St.c3の 100° 、St.c4の 135° に比べてかなり大きくなっており、視線方向の流速成分から流速ベクトルを算出する際の誤差が大きくなってしまいうことも原因と考えられる。

4.2 短波海洋レーダの観測結果より求めた福島沖の海域特性

前述の結果より、沖合約4kmのSt.c4より以遠では、短波海洋レーダと流速計による観測結果はよく一致しており、短波海洋レーダの信頼性が検証された。よって、以後の解析においては、沖合5kmから30kmまでの範囲を対象として、短波海洋レーダの観測結果を解析する。

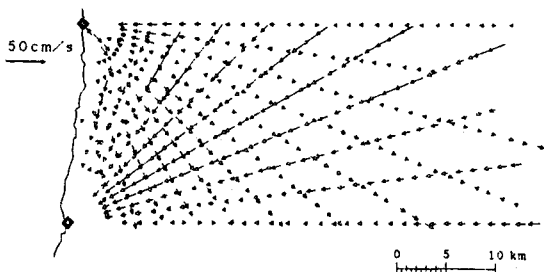


図-6 短波海洋レーダによって観測された
視線方向の流速成分

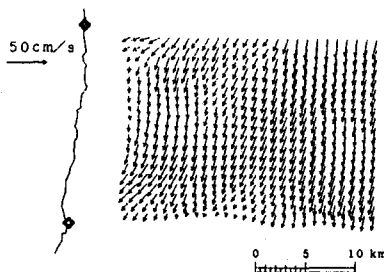


図-7 流速ベクトル図

図-6、図-7に、3月24日の8時から10時にかけて観測した各視線方向の流速成分の分布図、および直交格子上に線形補間した2次元流速ベクトル図の例を示す。なお、図-6は、沖合50kmまでのすべての観測値を表示している。このように、短波海洋レーダによる観測では、広範囲の海面流速を短時間に連続して観測でき、流速ベクトル図の時系列から、海域の詳細な変動を見ることが可能である。

加藤ら⁷⁾によれば、当海域における流動連続観測の結果、1～3日の周期で北流と南流が交互に出現し、年間を通じて南流が卓越していることが報告されている。短波海洋レーダによる今回の観測においても、図-4(a)からもわかるように、同様の傾向がみられた。

そこで、St.c3の観測結果において、当海域の特徴である2～3日間隔で南流から北流へと転流する3月30日の流速ベクトル、水平発散率、および渦度鉛直成分の時間的変化を調べた。3月30日の4時～6時、8時～10時、12時～14時、16時～18時、および20時～22時にかけて観測した流速ベクトルを図-8に、同時刻の水平発散率を図-9に、同時刻の渦度鉛直成分を図-10に示す。なお、図-9、および図-10において、正の値を実線、負の値を点線で示し、等値線間隔は $1 \times 10^{-5} (s^{-1})$ で示してある。

図-9より、南流から北流に転流するまでの間、沖合10km付近ではほぼ南北に境界ができており、岸側では常に収束が大きく、いっぽう沖側では次第に発散が大きくなっていき、転流した後は逆に沖合10km付近を境に岸側で発散が、沖側は15km付近までの間で収束が大きくなっていった。

図-10より鉛直渦度についてみると、沖合25km付近に、正負の渦度の境界が存在することがわかる。この付近は水深が約100～150mであり、海底地形などの影響により渦度の境界が形成されているものと思われる。

このように、短波海洋レーダを用いた本観測手法では、面的に詳細な流速分布を計測することができるため、こうした水平流れによる変形率や鉛直渦度などを連続して求めることができる。

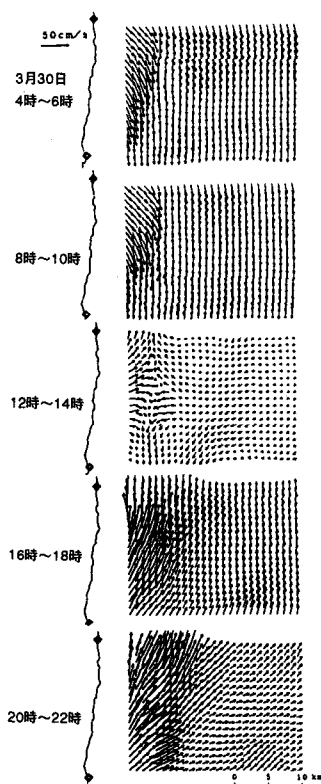


図-8 流速ベクトルの時系列

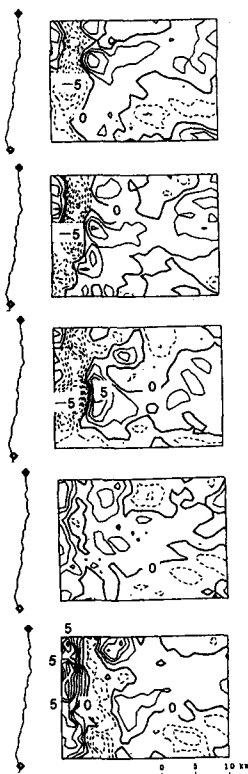


図-9 水平発散率の時系列

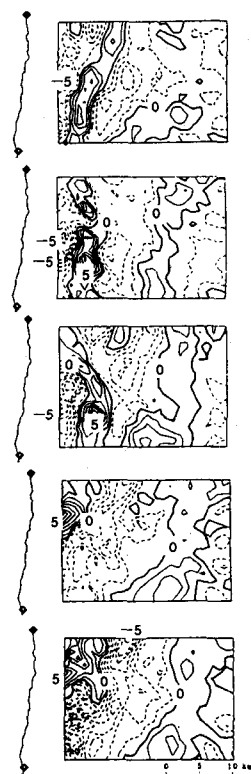


図-10 鉛直渦度の時系列

5. まとめ

2台の短波海洋レーダを用いて、福島沖の海域で観測した結果を流速計による同期観測結果と比較検討し、短波海洋レーダによる観測精度を検討した。沖合4km付近より沖側では流速計と非常に一致を示し、また流速値としては、20cm/sを境に、それより大きくなると流速計との相関がよくなることが確認された。

短波海洋レーダは、面的な海洋現象の時間的変化を詳細に把握することができ、船舶やブイなどによる従来の観測では困難な変形率や鉛直渦度などの面的時間変動を把握することができ、今後有望な観測手段であると思われる。

謝辞

本観測を行なうにあたり、三洋テクノマリン株式会社福島支店の方々、および(財)電力中央研究所我孫子研究所の豊田康嗣研究員に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 井口・梅原・大野・野崎：短波海洋レーダによる海流の観測，日本海洋学会春季大会講演集，pp.133-134，1989
- 2) 大野・久木・灘井・黒岩・徳田：2台の海洋レーダによる海流観測実験(II)，日本海洋学会春季大会講演集，p.195，1992
- 3) 灘井・黒岩・水鳥・坂井：海洋レーダによる海流観測の精度，日本海洋学会秋季大会講演集，pp.288-289，1993
- 4) 大野・井口・梅原・野崎：短波海洋レーダを用いた海流の観測，海洋調査技術1(2)，pp.55-60，September 1989
- 5) Barrick, D. E., Evans, M. W. and Weber, B. L. : Ocean Surface Currents Mapped by Radar, Science, 198, pp.138-144, 1977
- 6) 大野・久木・灘井・黒岩：2台の海洋レーダによる海流観測実験一速報一，日本海洋学会春季大会講演集，pp.195-196，1992
- 7) 加藤・和田・角湯：福島海域における流動と拡散特性，第22回水理講演会論文集，pp.55-60，1978