

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

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****

内湾域などにおける時間変動の激しい流動現象を観測するために、デジタルビームフォーミング方式を採用した短時間観測が可能な沿岸海洋レーダを新たに開発した。本レーダは約 20 km 四方の広域表層流速場を 500 m 間隔の格子上に 15 分間隔で連続観測することができ、またデータ通信機能により観測データを遠隔モニタリングすることができる。開発したレーダを伊勢湾湾奥域の現地観測に適用し、同時に得られた流速計データとの比較により、レーダの観測精度について検証した。さらに、自動流速検知のためのアルゴリズムと海洋レーダによる観測データの物理特性について検討した。

1. はじめに

我が国における海洋レーダの研究は、1990 年代から本格的に開始され、これまでに多くの現地観測を通じて、流速測定装置としてはほぼ実用段階にあることが確認されている（例えば、坂井ら、1996；Nadai ら、1999；中辻ら、1999）。国内では HF 帯と VHF 帯の電波が海洋レーダとして利用でき、（独法）通信総合研究所の HF レーダと国際航業（株）の VHF レーダが存在する。これらの海洋レーダは、狭ビームを用いて一方向の観測を順次繰り返しながら面的な情報を得るため、1 シーン（20 km～50 km 四方）の観測に 1～2 時間を要する。このため、内湾域など時間的な変動の激しい流動場を観測する場合、時間分解能の面で課題がある。この問題を解決するために、（財）電力中央研究所では、（独法）通信総合研究所との共同研究を通じて、2001 年にデジタルビームフォーミング方式を採用した短時間観測が可能な沿岸海洋レーダ CCMR（CRIEPI Coastal Marine Radar）を開発した。

海洋レーダは、広域の流速分布を天候に拘わらず連続観測できる利点を有しているため、環境モニタリングや防災分野などへの活用やデータ同化モデルへの応用が期待されている。しかし、これらの用途へ海洋レーダを適用していく上で、測定装置としての操作性や精度について検証し、また観測されるデータの物理特性を把握しておくことが重要である。本研究では、新たに開発した CCMR の概要を述べるとともに、CCMR を現地海域に適用し、同時期に得られた従来の流速計データとの比較により、CCMR の自動ピークサーチアルゴリズムに対する問題点、流速測定精度、ならびに CCMR が測定する表層流速の物理特性について検討した。

2. CCMR の概要

2.1 仕様・構成

CCMR の主な仕様を表-1 に示す。送受信方式の FMCW は、低い尖頭電力で高い平均電力が得られる FMCW 方式に対して、送・受信間のアイソレーションを得るために送信と受信を交互に繰り返す方式で、中心周波数 41.9 MHz に対して 300 kHz を掃引する。レーダの速度分解能は、パルス繰り返し周期 0.64 ms、掃引パルス数 512、積分掃引数 512 から 2.13 cm/s となる。また、ビームレンジ方向の距離分解能は 0.5 km、方位方向の分解能は 13°～17°である。なお、海洋レーダの観測原理は、坂井ら（1996）に詳しいのでここでは割愛する。

表-1 CCMR の基本仕様

項目	CCMR
空中線方式	デジタル・ビーム・フォーミング
送受信方式	FMCW（*1）
中心周波数	41.9 MHz
周波数掃引幅	300 kHz
送信出力	100 W
ビーム幅（*2）	13°～17°
観測範囲	0.5 km～25 km
距離分解能	0.5 km
速度分解能	2.13 cm/s
測定時間（*3）	15～20 分
設置面積	40 m×4 m 程度
データ処理	準リアルタイム

*1：Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave の略

*2：各方位毎のビーム幅

*3：1 シーン（20 km 四方）の観測に要する時間

写真-1、写真-2 に CCMR の観測シェルタと設置した受信アンテナ列を示す。観測シェルタ内に、送・受信機および観測制御とデータ収録のためのパソコンが収納されている。アンテナ系は、3 素子の送信アンテナ 1 組、2 素子の受信アンテナ 8 組で構成されており、これらの設置面積は幅 40 m×奥行 4 m 程度、アンテナの高さは 5.5 m 程度である。なお、移動時には、アンテナ類をすべてシェルタ内に収容して輸送できるようになっている。

* 正会員 工修（財）電力中央研究所 我孫子研究所
** 正会員 工博（財）電力中央研究所 我孫子研究所
*** 正会員 工博 中部電力（株）電力技術研究所
**** 工博（独法）通信総合研究所 亜熱帯環境計測 G
***** 工修（独法）通信総合研究所 亜熱帯環境計測 G

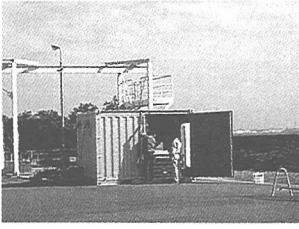


写真-1 観測シェルタ

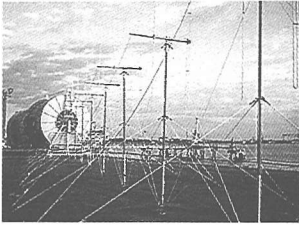


写真-2 受信アンテナ列

2.2 デジタルビームフォーミング方式

デジタルビームフォーミング方式は、受信アンテナアレイの各素子出力を A/D 変換器によりデジタル信号にし、各素子間の位相差を利用して信号処理の段階で受信ビームを形成する方式である（近藤ら，1993）。以下、デジタルビームフォーミング方式の原理を簡単に説明する。図-1 に示すように、 N 組の受信アンテナが等間隔で一直線に並んでいる場合において、アンテナ正面から θ_k の角度で入射する電波に対して、 n 番目の素子アンテナの位相 ϕ_n は以下のように表される。ただし、 λ : 電波の波長、 d : 素子アンテナの間隔である。

$$\phi_n = -\frac{2\pi}{\lambda} n d \sin \theta_k \dots\dots\dots (1)$$

このとき、 n 番目の素子アンテナ出力を $S_n(\theta)$ とすれば、 θ_k 方向に主ビームを形成するアンテナ放射パターンは以下ようになる。

$$B(\theta_k) = \sum_{n=0}^{N-1} S_n(\theta_k) \cdot e^{j\phi_n} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、各ビーム間における以下の関係式

$$\frac{d}{\lambda} \sin \theta_k = \frac{k}{N} \quad (k=0, 1, \dots, N-1) \dots\dots\dots (3)$$

と (1) 式を (2) 式に代入すると、

$$B(\theta_k) = \sum_{n=0}^{N-1} S_n(\theta_k) \cdot e^{-j2\pi nk/N} \dots\dots\dots (4)$$

となり、離散フーリエ変換の式が得られ、これより、 θ_k 方向のアンテナ放射パターンを求めることができる。CCMR では 8 組の受信アンテナを用いて、8 方向の受信ビームを生成する。このとき、各ビーム幅（方位方向の分解能）は、正面方向で 13° 、正面から 40° 方向で 17° 程度

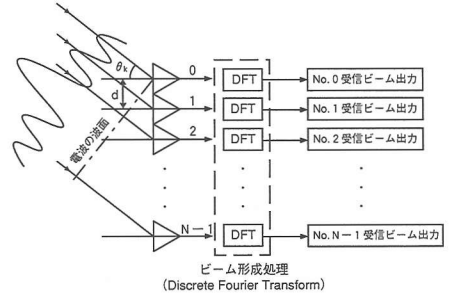


図-1 デジタルビームフォーミング方式における各受信アンテナ素子間の関係

となる。このようにデジタルビームフォーミング方式では、信号処理の段階で任意の受信ビームを生成できるため、各方向に位相を振って順次観測する必要がなく、結果的に短時間観測が可能となる。実際の観測では、2 組の CCMR により 15 分観測を交互に行い、各サイトで得られた 30 分間隔のデータを時間方向に線形内挿し、15 分毎に流速分布を求める。得られた観測データは、PHS のデータ通信機能により、遠隔地へデータ転送でき、準リアルタイムモニタリングが可能となる。

2.3 自動ピークサーチアルゴリズム

CCMR による流速観測では、1 観測に付き 8 方向それぞれに対してレンジ毎にピーク解析を行う必要があり、これが 15 分毎に繰り返されるためデータ数が膨大になる。そこで、精度良く 1 次散乱を自動検知できるアルゴリズムを開発しておく必要がある。ただし、後述するように自然環境下では予測不能な外来ノイズが存在するため、マニュアル補正機能も行えるようにした。

CCMR で採用した自動ピークサーチアルゴリズムのフローを図-2 に示す。まず、データ処理を高速化するために 1 次散乱ピーク探索幅を設定し、正負の周波数領域内で、それぞれドップラースペクトルのピーク位置を求める。次に、正負それぞれの領域のピーク値が、ノイズレベルに対して必要な閾値を越えているかどうかをチェックする。続いて、ピークを示す周波数に対してモーメント法を適用し、正負の周波数領域における 1 次散乱周波数を決定する。最後に、モーメント法で得られた視線流速成分に対して、メディアンフィルターによって、船舶ノイズ等を除去する。採用する視線流速値としては、正負両ピークに対して受信レベルの大きい方を採用するモードと、正負ピーク位置の平均値を採用するモードの 2 種類が選択できるようになっており、本研究では、受信レベルが大きいピーク値を採用するモードで解析を行った。流速分布の算出にあたり、各ビームのレンジ毎の視線流速を基に、500 m 格子の直交座標系にデータを空間内挿した。

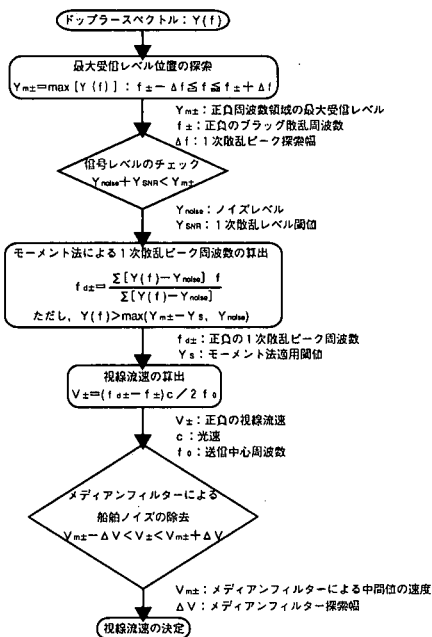


図-2 自動ピークサーチアルゴリズムの処理フロー

3. 現地観測の概要

観測範囲と測点位置を図-3に示す。2組のCCMRを伊勢湾湾奥部のA局とB局に設置し、点線で示した各8方向の視線流速成分から水平流速分布を算出した。観測期間は、2002年2月18日9時15分～2月26日9時15分までの8日間である。同期間、測点St.1とSt.2において、水深1mと2mに電磁流速計を設置し、5分間隔で連続観測を行った。また、同地点で、中層から表層を中心に水温、塩分の密度観測を行った。さらに、2月23日に、図のA点からD点までの7測点において、船舶移動による流速と水温、塩分のスポット観測を計4回実施した。流速計は1,200 kHzのブロードバンドADCPを用い、測

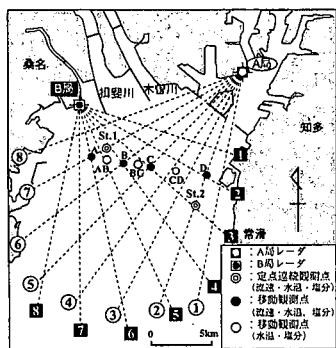


図-3 観測範囲と測点位置

点A, B, C, Dにおいては、流速、水温、塩分、測点AB, BC, CDにおいては、水温、塩分の鉛直分布を観測した。

4. 観測結果

4.1 A・B両局の電波環境

A局及びB局に設置したCCMRのドップラースペクトルの例を図-4に示す。図は、各ビームのレンジ方向に対するドップラースペクトルをグレースケールで示しており、黒くなるほどエネルギーが大きい。なお、図中に示した角度は、各ビームのアンテナ列正面方向に対する相対角度である。A局では、設置場所の制約で、ビーム正面方向が観測対象領域の中心からずれていることや、正面の知多半島や人工島などの影響で、レンジ10 km以上の受信レベルが低くなる傾向が見られた。これは、特にビーム番号4～8で顕著であった。一方、B局では、アンテナ正面方向の見通しが良く、どのビームについても概ね良好なデータが得られた。ただし、本海域では、図-4のB局25 km付近で見られるような外来ノイズが夜間を中心に間欠的に発生したため、受信状態の悪いA局のビーム番号4～8では欠測となる場合が多く見られた。この外来ノイズの原因は不明であるが、ノイズ影響下においても、B局のように受信状態が良い地点では、ほぼ1次散乱ピークを検知することができた。

4.2 自動ピークサーチアルゴリズムの課題

CCMRでは流速測定装置としての操作性、信頼性を考え、2.3で述べたモーメント法とメディアンフィルターに基づく自動ピークサーチアルゴリズムを開発・導入した。本節では、実際の観測結果を基に、アルゴリズムの問題点について考察する。

図-5(a), (b)に誤ったピークサーチ結果を含む解析例を示す。横軸が視線流速、縦軸がレンジ（距離）を示し、黒塗りの丸が正のピーク採用値、グレー塗りの丸が

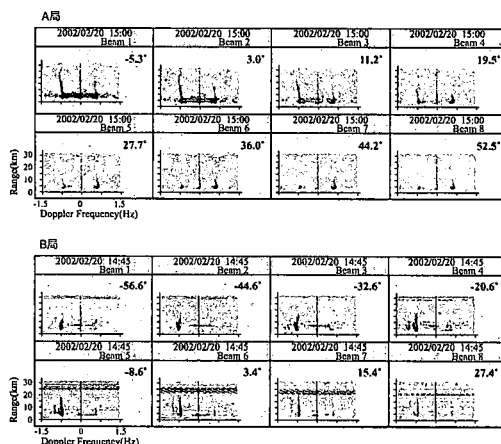
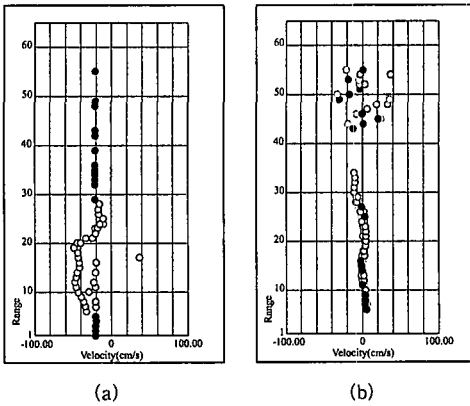


図-4 受信ドップラースペクトルの対距離表示

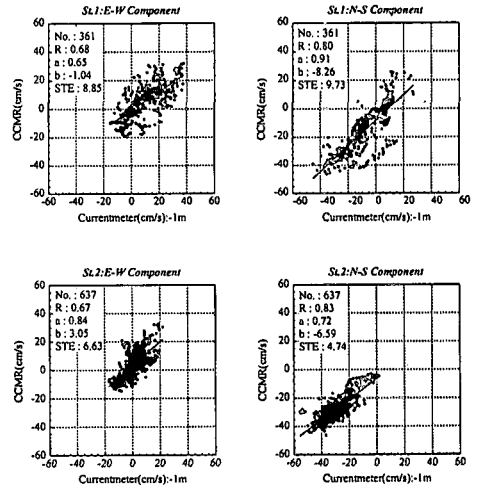


図—5 誤ったピークサーチ結果を含む解析例：(a) レンジ方向に一樣なノイズが存在する場合、(b)：特定のレンジ範囲にノイズが存在する場合

負のピーク採用値、白抜きの黒丸とグレーの丸がそれぞれ採用されなかった正負のピーク値である。(a)はレンジ方向に一樣なノイズが存在する場合、(b)はレンジ40以遠にノイズが存在する場合である。(a)、(b)とも、流速の出現範囲内にノイズが存在するため、本アルゴリズムでは1次散乱と誤って検知している。しかし、レンジ方向に連続して同じ位置にピークが現れるため、流動現象としては不自然であり、ノイズと判別できる。また、(b)では、レンジ方向の不連続性と値のばらつき具合から、同じく流動現象としては不自然であり、ノイズと判別できる。本研究では、これらのケースに対して、マニュアル機能によりデータを補正した。ただし、この作業だけでも膨大な時間を要するため、より精度の高い自動ピークサーチアルゴリズムへの改良が望まれる。

4.3 CCMRの流速測定精度

図—6に、測点 St.1 と St.2 における CCMR と水深 1 m 層の電磁流速計による観測データの回帰分析結果を示す。上段が St.1、下段が St.2 で、それぞれ東西成分(左)と南北成分(右)に分けて解析した。前述のように期間中 St.1 を中心に欠測となる場合が見られたため、データ数は St.2 の 637 点に比べ、St.1 では 361 点となった。両地点の相関係数は 0.7~0.8 程度であり、南北成分の方が相関が良く、標準誤差は 5 cm/s~10 cm/s 程度となった。回帰直線の傾きが 1 より小さくなっているが、これは、流速計が点データであるのに対して、CCMR の観測値はビーム幅とビームレンジ方向の分解能から決まる台形セルにおける空間的な平均値として観測されるためである。また、回帰直線の切片に付いてみると、東西成分に比べて、南北成分の値が大きき、-7 cm/s 程度となっている。Stewart ら (1974) によれば、41.9 MHz の海洋レーダの測定層は約 0.3 m であり、切片の値は両データの測定層の違いによる流動場の違いを示していると考え



図—6 CCMR と流速計による観測結果の比較 (No.: データ数, R: 相関係数, a: 回帰直線の傾き, b: 回帰直線の切片, STE: 標準誤差)

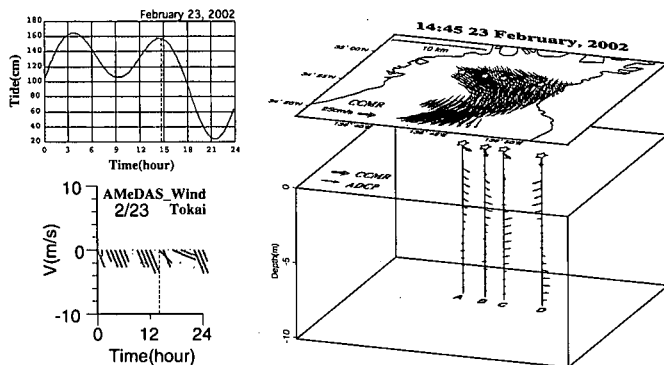
られる。なお、CCMR と水深 2 m 層の流速計とを比較した結果は、水深 1 m 層との比較結果より悪くなり、相関係数 0.4~0.7 程度、標準誤差 6 cm/s~13 cm/s 程度であった。

4.4 CCMR による観測データの物理特性

海洋レーダは、極表層の流れ場を観測するため、表層の流動特性とそれ以深の流動場との関連性を把握しておくことは、海洋レーダのデータを様々な分野で活用していく上で重要となる。本節では、CCMR によって測定された流動場の物理特性について検討する。

図—7に、2月23日の第3回目の移動観測結果(測点 A, B, C, D: ☆で表示)と CCMR の観測結果を示す。移動観測は 13 時 59 分から 15 時 22 分にかけて行われたため、代表時間として 14 時 45 分における CCMR の結果を示している。また、併せてその時の潮位と東海地点のアメダスの風データを示した。ADCP による移動観測の流速値は水深 1.73 m から 0.5 m おきに 9.73 m まで示している。CCMR の値は水深 0.3 m の位置に白抜きのベクトルで示した。本時刻はほぼ満潮時にあたっているが、北西風の影響もあり、表層では全体的に時計回りに南流傾向となっている。

CCMR による表層の流れと 1.73 m 以深の流れを比較すると、測点 D を除く 3 測点では CCMR の結果と上層の流れは良い対応を示しているが、中層から低層にかけては流れの傾向が変化していることが分かる。概ね測点 A と B では 2 層の流れ、測点 C と D では 3 層の流れとなっている。St.1 と St.2 における水深 1 m と 2 m の電磁流速計の連続観測結果(2月5日~2月27日までに 23 日間)を基に、スペクトル解析と調和解析を実施した結果、



図一七 CCMR による表層流速分布と移動観測による水平流速場の鉛直分布

本海域では M_2 分潮が卓越し（東西成分 5 cm/s 程度，南北成分 10 cm/s 程度），続いて S_2 分潮と K_1 分潮が卓越していた。しかし，平均流成分も M_2 分潮同様に大きく，西側海域の St.1 では 6~7 cm/s で 1 m 層が南東方向，2 m 層が東方向と流向が変化していた。一方，東側海域の St.2 の平均流は M_2 分潮に比べて 2 倍以上大きく，両水深とも南方向に 25 cm/s 程度となった。欠測の少なかった St.2 における CCMR の 8 日間のデータから平均流を求めた結果，南方向に 28 cm/s となり，水深 1 m 層の電磁流速計の結果と類似したものとなった。これより，表層から水深 1 m までの平均流については，風と河川水の影響が強いことが予想される。そこで，吹送流の影響について検討するため，St.1 と St.2 における水深 1 m の電磁流速計のデータを用いて，東海地点のアメダスの風データとの相互相関を調べた。その結果，風に対して 1~2 時間の位相遅れで相関が最大となり，相関係数は 0.3~0.4 程度であった。次に，河川水の影響について検討する。St.1 と St.2 における密度の鉛直分布の時系列データを見てみると，表層から水深 2 m 程度まで，潮位変化に対応して河川水により淡水化する変動が見られ，St.2 に比べて St.1 はかなり激しく変動している。期間中雨はほとんど降っていないため，この密度変化は河川水の影響と考えられ，また流動場に対する影響は場所によってかなり違うことが予想される。今回の観測では西側海域を中心に欠測データが多かったため，潮汐差流についての検討ができなかったが，本海域においては，風，河川水，潮汐が複雑に影響し合い，表層と中層，および下層では大きく違った流動特性を示すことが確認された。

5. ま と め

新たに VHF 帯を用いた短時間観測が可能な海洋レー

ダ CCMR を開発し，現地観測を通じて，レーダの測定精度，解析アルゴリズムの問題点，および観測データの物理特性について検討した。その結果，CCMR の測定精度は流速計との比較から 5 cm/s~10 cm/s 程度の精度があること，解析アルゴリズムについては外来ノイズなどに対して改善の余地があることが分かった。また，本海域では，3 次元流動場が 2 層から 3 層の複雑な分布となっていることが確認され，CCMR が観測する表層流動場に関しては風と河川水の影響が強いことが示された。今回は外来ノイズなどの影響で間欠的な欠測が見られたため，内湾流動場の短時間変動特性について十分な検討が出来なかったが，この点については今後検討を進めていきたい。

最後に，本研究を実施するにあたり，中部電力株式会社の依田眞氏，林治巳氏，佐合篤氏，前田良明氏，森島茂樹氏，ならびに三菱電機株式会社の船井幹夫氏，国土環境株式会社の五十嵐弘昭氏に御協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 近藤倫正・大橋由昌・実森彰郎 (1993): 計測・センサにおけるデジタル信号処理，昭晃堂，202 p.
- 坂井伸一・水鳥雅文 (1996): 短波海洋レーダによる表層流速観測の適用性，電力中央研究所報告，U 96025，34 p.
- 中辻啓二・石塚正秀・徳田正幸・村上和男・藤原建紀 (1999): VHF 海洋レーダによる表層流動の観測と ADCP による検証，水工学論文集，第 43 巻，pp. 845-850.
- Nadai, A., H. Kuroiwa, M. Mizutori and S. Sakai (1999): Measurement of ocean surface currents by CRL HF Ocean Surface Radar of the FMCW type. Part 2. Current vector, J. Oceanogr., Vol. 55, pp. 13-30.
- Stewart, R. H. and J. W. Joy (1974): HF radio measurements of surface currents, Deep-Sea Res., Vol. 21, pp. 1039-1049.