

DBF 海洋レーダの表層流速自動推定法

Automatic Estimation Method for Surface Currents from Doppler
Spectrum Measured by DBF Marine Radar

坪野考樹¹・森 信人²・松山昌史³・坂井伸一⁴

Tsubono TAKAKI, Nobuhito MORI, Masafumi MATSUYAMA and Shin-ichi SAKAI

We develop a method automatically identifying peak frequencies in the sea echo Doppler spectrum measured by DBF Marine Radar system to estimate coastal surface currents, and then evaluate the accuracy and limitation of this method. The velocities from the Radar system estimated with this method are compared well with near-surface data with ADCP. The processing time of this method is short in about 40 seconds. These results suggest that this method allows one to estimate remotely coastal surface current in real time using DBF Marine Radar system.

1. はじめに

海洋レーダでは、電波の送受信により海洋面からのビーム方向の散乱波のスペクトルを収録している。そして、レーダによる観測は、計測したスペクトルデータが、特定の海面波の位相速度に相当する周波数近傍で大きな強度となるピークを持つこと、このピークの周波数が、海面波の位相速度に相当する周波数から海域流動によってドップラーシフトしていること、およびドップラーシフトした周波数に相当する流速値が分かっていることを利用している(藤井, 2003)。そのため、レーダで得られる流速値は、海表面における海洋レーダのビーム方向流速(視線流速)となり、収録したスペクトルデータからピーク周波数位置を推定する必要がある。

電中研では、沿岸流速観測のための DBF 技術を利用した VHF レーダ(DBF 海洋レーダ)を開発し(坂井ら, 2002)、通信機器を用いた遠隔地からのリアルタイム海況モニタリングシステムの実用化を目指している。ただし、その実現には、レーダで計測したスペクトルデータからピーク周波数を自動的に検出する必要がある。

DBF 海洋レーダでは、500 m 間隔約 32 km、8 方位を 15 分という短時間で連続的に海域からのスペクトルを計測および収録できるため、本レーダを用いたモニタリングには、64×8 のスペクトル情報から約 15 分間以内にピーク周波数を検出しなければならない。

レーダで収録されたスペクトルデータには、海洋船舶からの反射などの外因性のノイズが含まれており、ドップラーズpekトルのピークが不明瞭となるためにピーク周波数の検出が困難となることや、逆に外因性ノイズをピークとして誤検出することがある。例として、図-1 にレーダで

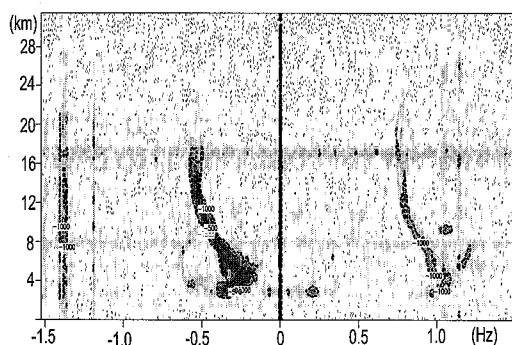


図-1 レーダで受信したドップラーズpekトルの例

受信した1つの方位におけるビーム方向および周波数方向の一般的なスペクトルを示す。コンターの値はスペクトル強度を示し、縦軸および横軸はそれぞれビーム方向の距離および周波数である。図-1 に示したスペクトルデータは、周波数方向 -1.3 Hz の位置に大きなノイズが見て取れ、またピーク形状がビーム方向 17 km の位置において周波数方向に双峰となっている。

以上の理由から、リアルタイム海況モニタリングシステム実現には、2つの条件(短時間、ノイズ影響の回避)を満足するピーク周波数検出アルゴリズムが必要となる。

これまで、坂井ら(2002)と森ら(2004)が、ドップラーズpekトルからピーク周波数を自動的に検出するアルゴリズムを提案している。両者の方法では、ノイズ影響を回避する対策や工夫がなされているが、リアルタイム海況モニタリングに用いるには、以下に示す課題がある。坂井らの方法では、得られたピーク位置を見直す必要があり、ノイズ起因でピーク周波数を誤検出した場合は、手動による除去や目視によるピーク周波数の再検出が必要となる。また、森らの方法では、処理時間が坂井らの方法と比べて大きく、ピーク周波数の検出においてスペクトルの分布形状を考慮してしない。

1 正会員 工博 (財)電力中央研究所 環境科学研究所
2 正会員 博(工) 大阪市立大学講師大学院工学研究科
3 正会員 工修 (財)電力中央研究所 地球工学研究所
4 正会員 工博 (財)電力中央研究所 環境科学研究所

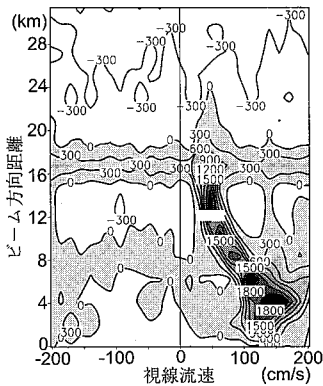


図-2 正負領域を合計して低解像度化したスペクトル C^-

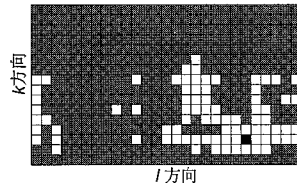


図-3 図-2 から 2 値化した行列 $F_{k,i}$

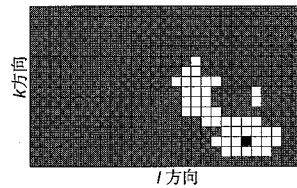


図-4 フィルタとして用いる行列 $X_{k,i}$

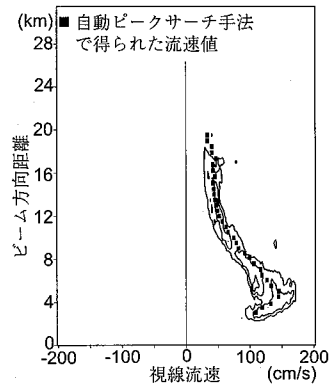


図-5 スペクトル C^- について図-4 のフィルタを適用したスペクトル D

本研究では、遠隔地からのリアルタイム海況モニタリングの実用化を目的として、両者の方法を参考に、新たなピーク周波数検出アルゴリズム（自動ピークサーチ法）を構築した。そして、この方法で得られた結果と観測結果を比較することにより、手法のリアルタイム海況モニタリングへの適用性について検討した。

2. 自動ピークサーチ法

坂井ら (2002) と森ら (2004) が提案したアルゴリズムは、スペクトルに含まれるノイズの対策として、流速が距離方向に連続的に変化する、つまり視線流速の変動がビーム方向に小さいとした仮定を採用している。ただし、両者では、以下に示すように、仮定の使用法と順番が異なる。

前者では、ビーム方向で最大のスペクトル強度となる周波数周辺のスペクトル強度から重心を計算してピーク周波数とし、ビーム方向全てのピーク周波数を推定した後、誤検出したピーク周波数を濾過するために連続性の仮定を用い、距離方向に不連続なピーク周波数を除去している。

一方、後者では、ビーム方向と周波数方向のスペクトルデータがある閾値の大小で 2 値化し、閾値より大きな領域を全て抽出した後、ビーム方向ごとに領域端部の周波数を求め、これら両端部での周波数の中間値をピーク周波数としている。そのため、流速の連続性の仮定を、ある閾値より大きな領域はピーク周波数を含み、さらに領域は閉曲線で囲まれるとした仮定に発展させて領域の抽出に用い、領域抽出の段階でノイズを濾過している。

連続性の仮定以外の両者の違いでは、前者ではスペクトル強度の分布を考慮するのに対し、後者では考慮していない点があげられる。

本研究で構築したアルゴリズムは、両者のアルゴリズムを参考にピーク周波数を検出した。まず森らの方法と同様に、スペクトルデータからピーク周波数を包含する

距離および周波数方向の領域を抽出する。次にこの領域を通過域とするフィルタとしてスペクトルデータに適用し、最後に濾過されたスペクトルについて、坂井らの方法と同様に、重心を計算してピーク周波数を推定した。

ただし、森らが提案したある閾値以上を包含する領域を抽出するアルゴリズムは、ピーク周波数を包含する領域が複数抽出されるなどの課題があることから、本研究では、スペクトルデータをビーム方向および周波数方向に解像度を低下させ、さらに最大のスペクトル強度を含む領域のみを抽出するアルゴリズムとした。そして、領域抽出のアルゴリズムにおいても、森らの手法より簡略化して短時間で処理できるようにした。

(1) アルゴリズムの概要

アルゴリズムは、スペクトルデータの前処理 (第 1 段階)、ピーク周波数位置の特定 (第 2 段階) でピーク周波数を検出し、最後にピーク周波数検出と流速値への変換 (第 3 段階) で処理を終了する。以降において、アルゴリズムの概要を、その適用例とともに説明を行う。

第 1 段階 図-1 での横軸の正、負周波数の領域は、それぞれ近づく、遠ざかる波のドップラースペクトルを示しており、両側のスペクトルは同じ流速情報を含んでいる。

まず、第 1 段階の最初の処理として正負両側のスペクトルを、ビーム方向 i と周波数方向 j とするスペクトル強度の行列 $A_{i,j}$, $B_{i,j}$ に分割する。ここに、行列 A , B は同じ大きさとする。また、以降において説明が無い限り、大文字のアルファベットは行列を示す。

次に、ピーク周波数近傍のスペクトル強度を正とすることを目的に、 A , B から各距離ごとのスペクトル強度の平均値を差し引いた A' , B' を計算する。そして、この A' , B' から、ビーム方向および周波数方向について一定間隔 $(i, j) = (4, 7)$ の矩形全体のスペクトル強度の平均値を計算し、分解能を下げた A'' , B'' を計算する。最後に、 A'' , B'' の和より C'' を計算する。なお、一

定間隔の矩形の大きさは、試行錯誤的に決定した。

図-2に C^- を示す。ここに、横軸は、図-1とは異なり、周波数から変換した視線流速を示し(坂井ら, 2002), 縦軸はビーム方向 j ではなくビーム方向距離を示す。

第2段階 まず、図-2の結果 C^- において最大のスペクトル強度の位置 k', l' を特定する。そして、スペクトル強度の閾値を設定して、 C^- の強度についてその閾値に対する正負の判定を行い、正であれば1, 負であれば0とするビーム方向, 距離方向の行列 $F_{k,l}$ を計算する。ただし、本アルゴリズムでは、ビーム方向30kmにおける最大となるスペクトル強度を閾値とした。

次に、行列 $F_{k,l}$ から隣接行列 $G_{m,n}$ を設定する。すなわち、 $G_{m,n}=0$ とあらかじめ設定し、番号 m に対応する行列 $F_{k,l}$ が1のとき、 $G_{m,n}=1$, そして番号 m の上下左右の位置 $k \pm 1, l \pm 1$ の番号 n に対応する行列 $F_{k \pm 1, l \pm 1}$ の値が1であれば $G_{m,n}=1$, 0であれば $G_{m,n}=0$ とした隣接行列 $G_{m,n}$ を設定する。ここに、 m, n の大きさは、周波数, ビーム方向の数の積 $k \times l$ となる。そして、最大のスペクトルとなる位置 k', l' に対応する m を m' とする。

そして、隣接行列 $G_{m,n}$ について、式 $G_{m,n}^{h+1} = \min(1, G_{m,n}^h \cdot G_{m,n})$ の計算を、 $G_{m,n}^h$ が定常になるまで繰り返す。

最後に、定常となった $G_{m,n}^h$ に対して、 $G_{m,n}^h$ が1である n に対応する k, l を計算し、 $F_{k,l}$ の成分以外を全て0とした行列 $X_{k,l}$ を計算して第2段階の処理を終了する。つまり、この処理により、 C^- において、最大のスペクトル強度の位置 k', l' と連結している領域が抽出される。ここで、以降の処理を容易にするために、行列 $X_{k,l}$ の周波数方向 l に1が8個以上ある距離 k については、 C^- のスペクトル強度が最大となる周波数 $l_{\max}$ の前後3つの列以外を0とした。

図-3に正負の行列 $F_{k,l}$ の結果を示す。灰色四角が閾値以下のスペクトル強度の位置, 白四角が閾値以上の位置を示し、行列 $F_{k,l}$ ではそれぞれ0と1の値となる。また、黒四角が図-2のスペクトル最大の位置 k', l' である。次に、図-4に、第2段階の処理で得られた行列 $X_{k,l}$ を示す。図中の白四角が、行列 $X_{k,l}$ の各成分が1の位置を示し、白い四角の領域がピーク周波数を含む領域となる。この白四角の領域を以降の計算ではフィルタとして用いる。

第3段階 まず、第一段階でのスペクトル A', B' の和からスペクトル C' を計算する。次に、スペクトル C' にフィルタを適用し、行列 $X_{k,l}$ が1以外の領域を0とするスペクトル $D_{i,j}$ を計算する。そして、各ビーム方向 i におけるスペクトル $D_{i,j}$ から、周波数方向でモーメントと平均を計算して重心を決定し、この重心をピーク周波数とする。最後に、ピーク周波数と変換係数との積で視線流速を算出する。

図-5に、 C' に図-4のフィルタを適用したスペクトル

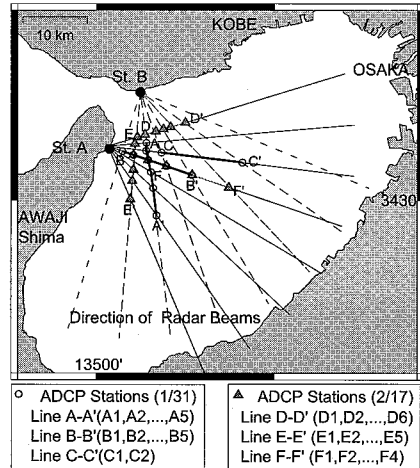


図-6 レーダ設置地点およびビーム方向

D を示す。図中の黒四角は、スペクトル D から計算したピーク周波数から変換した視線流速を示している。

3. アルゴリズムの評価

自動ピークサーチで得られた結果の評価には、2003年1月から2月での大阪湾明石海峡付近におけるレーダ観測の結果(坂井ら, 2004)を用いた。まず、自動ピークサーチ法をレーダによる観測結果に適用し、得られた視線流速の結果と ADCP で観測した結果と比較した。そして、自動ピークサーチ法で得られた視線流速と坂井ら(2004)での方法により手動補正で推定された結果と比較し、最後に処理時間について検討した。

(1) 観測の概要

2台の DBF レーダを国営明石海峡公園整備地内(A局; St.A)と神戸市垂下水処理場内(B局; St.B)に設置し、2003年1月18日から2月20日までの1ヶ月間にわたり、観測を行った。図-6に大阪湾明石海峡領域における観測でのレーダの設置点およびビーム方向を示す。

1月31日と2月17日に船舶に取り付けた ADCP を用いて、図-6に示した測定点(○, △)における流動を観測した。流速観測は、3隻の船舶の側面に ADCP を設置して実施し、1月31日では A-A', B-B', C-C' ライン(○), 2月17日では D-D', E-E', F-F' ライン(△)を異なる船舶で移動して、A局, B局のレーダのビームが重なる地点で実施した。

ADCP による観測は、各測定点で数十分計測した後、測定点を移動するとして観測を繰り返して実施した。また、レーダの流速結果との比較には、ADCP で観測された流速結果のうち、最上層である水深約2mの結果を用いた。

(2) ADCP との比較結果

自動ピークサーチで算出されたビーム方向の流速 $^{\circ}U$

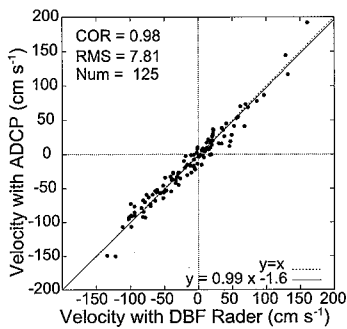
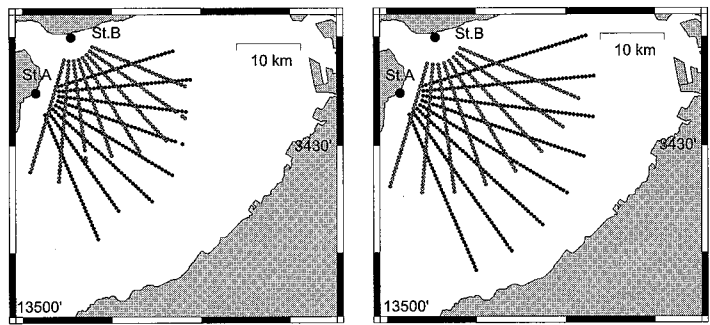


図-7 自動ピークサーチで算出された流速と ADCP の結果との比較



(a) 自動ピークサーチでの取得率

(b) 手動補正での取得率

図-8 流速データの取得率 85%以上の観測点

と ADCP で得られた流速 U とを比較した。レーダによる視線流速の結果は、15 分間に観測されたスペクトル結果から算出された結果であることから、ADCP の結果についても、レーダの観測時刻にあわせて時間平均の値を計算した。そして、ADCP で得られた流速はレーダの視線方向の流速に変換した。

図-7 に、1 月 31 日と 2 月 17 日の結果についてのレーダのスペクトルから自動ピークサーチで算出された流速および ADCP で計測した流速の散布図を示す。ここに、横軸がレーダによる、縦軸が ADCP による流速を示す。また、図中には $y=x$ をあわせて表示している。図中の COR, RMS および Num は、それぞれ相関係数、両流速差の二乗平均平方根および観測点総数である。

散布図から DBF レーダと ADCP により得られた流速結果が $y=x$ 近傍に位置し、自動ピークサーチされた流速値は、ADCP で得られた流速結果と同様な結果となった。また、レーダと ADCP で計測した流速結果の相関係数は、98 % 以上と高い値を示し、両流速値の差の RMS は約 8 cm s^{-1} と小さな値を示した。

(3) 手動補正した結果との比較

レーダで得られたスペクトルデータから、自動ピークサーチと手動補正で算出した視線流速について比較した。ただし、自動ピークサーチで得られた結果と手動補正した結果の比較は、レーダで連続観測出来た 1 月 18 日から 1 月 31 日計 14 日間の結果を用いた。

まず、流速データの取得率について検討を行い、次に流速結果の違いについて検討を行った。

a) 流速データの取得率

観測期間中に取得可能なデータのうち、自動ピークサーチや手動補正で検出できたデータ数の割合を取得率として、両者の取得率を比較した。

図-8 の (a) に、自動ピークサーチの流速データの取得率、および (b) に手動補正の取得率を示す。ここに、図中の丸は、取得率が 85 % 以上の地点を示し、黒丸は A 局の取得率、および灰色丸は B 局の取得率を示す。

自動ピークサーチによる結果では、A 局では約 20 km まで、B 局では約 16 km までのビーム方向の流速が、良好に測定できた。ただし、この結果は、手動補正で算出した流速結果よりも、約 3 km 短いものとなった。これは、レーダより遠方になると、受信したスペクトル強度が小さくなるために、ピーク周波数近傍のスペクトルが自動ピークサーチの第 2 段階で設定した閾値よりも小さくなるのが原因と考えられる。この改善には、閾値の値を下げるなどの方法が考えられるが、逆にノイズ起因の領域を増大させる可能性がある。手動補正と同じレベルまで取得率を上げるには、別の方法などの検討が今後必要となるが、レーダの解像度 (500 m) を考えると、取得可能な距離に対する 3 km の点数は、約 38 点に対して 6 点程度となっており、本手法の海域流動モニタリングへの適用には問題がないと考えられる。

b) 視線流速の比較

流速データの取得率が 90 % 以上の全観測位置、全観測期間の視線流速について、自動ピークサーチおよび手動補正で得られた結果の比較を行った。

図-9 に、各観測期間、各局における自動ピークサーチおよび手動補正で算出した視線流速の差のヒストグラムを示す。図中の Num, COR., および RMS は、両手法で算出した視線流速のデータ総数、相関係数、およびそれぞれの流速差の標準分散を示す。

ヒストグラムに示すように、頻度は 0 cm s^{-1} 近傍 (-2.5 cm s^{-1} から 2.5 cm s^{-1} の間) で最大となった。そして、両手法で得られた視線流速の差は RMS が約 14 cm s^{-1} 以下となり、両者の相関は約 0.96 以上と高い値となった。

c) 潮汐分布および平均流速の分布

前項での視線流速の比較では、スペクトルに含まれるノイズの影響やピーク周波数の検出法の違いにより、短期的・局所的な違いが生じると考えられる。ただし、モニタリングにおいて重要となるのは、長期的・空間的な違いであるため、以降において潮汐分布と平均流速について比較・検討を行った。

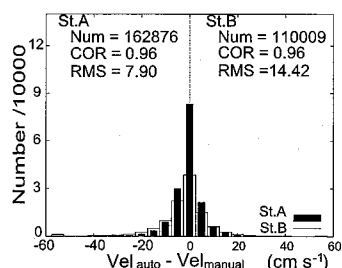


図-9 自動ピークサーチと手動補正で算出した視線流速の差のヒストグラム (黒, 白: A局, B局)

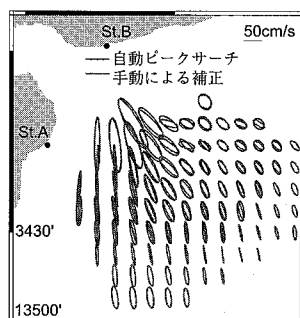


図-10 M2分潮流楕円

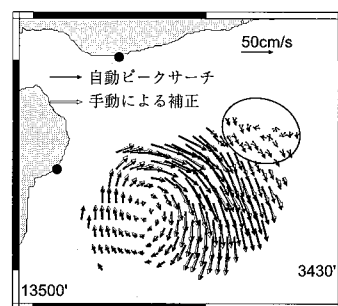


図-11 平均流速

自動ピークサーチおよび手動補正によって算出した流速結果から, M2分潮(太陰半日週潮), および K1, S2, O1の分潮の潮流楕円を計算した. 各分潮の潮流成分は, 視線方向流速の各分潮の振幅などを最小二乗法により計算し, 得られた結果から坂井ら(2002)の方法で空間内挿および合成して格子点毎の潮流楕円を計算した. 図-10に, 自動ピークサーチした流速結果(黒線)および手動補正で算出した流速結果(灰色線)から得られた M2分潮結果を重ねて示す.

両手法で得られた M2分潮の潮流楕円の結果は, レーダの設置位置から離れた場所において形状が若干異なるが, ほとんどの海域において楕円の主軸の向き, 大きさが同程度となっており, 同形状を示した. また, 図には示さないが, 他の潮流楕円に関しても, M2潮流楕円と同様に, それぞれの手法で得られた結果は同様な形状を示した.

潮流楕円の計算と同時に, 全観測期間の視線流速について平均値を計算し, 空間内挿および合成して, 格子点毎の結果を表示した. 図-11に, 自動ピークサーチした流速結果(黒矢印)および手動補正で得られた流速結果(白抜き矢印)を用いて得られた平均流速結果を重ねて示す.

両手法で得られた平均流速の結果は, 潮流楕円と同様に図中の楕円線で囲まれた領域(レーダの設置位置から離れた地点)で異なるが, それ以外の海域では, ベクトルの向き, 大きさが同程度となった. 両者の平均視線流速について相関係数を計算したところ, 0.98以上となっており, 非常に高い相関を示した.

(4) 処理時間

パソコン (ICPU: Intel Pentium 4, 2.4 GHz) を用いて, 15分間のレーダ観測で得られた 8方位 64レンジのスペクトルデータに本手法を適用したところ, 約 30秒で処理が終了した. ここに, レーダ各局のインターバルが現在 30分であるので, 視線流速の算出はインターバル間に容易に処理できる.

4. ま と め

通信機器を利用した DBF 海洋レーダによる遠隔流況

モニタリングシステムの開発を目的に, 海洋レーダで観測したスペクトルデータから短時間かつ自動的に一次散乱ピーク周波数を検出する手法(自動ピークサーチ手法)の開発を行った.

この手法を 2003 年 1 月から 2 月までに実施した明石海峡周辺海域でのレーダ観測に適用し, 船舶に係留した ADCP により直接観測した流速結果および手動補正で検出した流速結果と比較した. その結果, 自動ピークサーチで得られた視線流速結果は, ADCP で直接計測した結果と比較して同様な結果が得られ, 本手法により現場海域の流動を正確に把握できることが示された. そして, 自動ピークサーチで得られた視線流速は, 手動補正で得られた結果と同程度となり, 手動補正でピークを検出する方法と同程度の流速が推定できた. また, 自動ピークサーチ法をレーダ観測で得られた 8 方位 64 レンジのスペクトルデータに適用したところ, 処理時間が 30 秒程度となっており, 各局レーダのインターバル期間 30 分よりも十分小さくなった.

以上の検討結果により, 本研究で示した自動ピークサーチ法は, 遠隔流況モニタリングに適用可能と考えられる.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 大阪大学の中辻啓二教授ならびに西田修三准教授にご協力していただきました. 記して感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 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・佐藤健一・松岡建志(2002): 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, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1511-1515.
- 坂井伸一・松山昌史・坪野考樹・森信人・中辻哲二・西田修三・中池悦郎・谷川陽裕(2004): DBF レーダによる沖ノ瀬還流域の広域流動観測, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1416-1420.
- 藤井智史(2004): 海洋レーダの技術と歴史, 沿岸海洋研究, Vol. 41, pp. 97-108.
- 森信人・坂井伸一・松山昌史・坪野考樹・西田修三・清水隆夫・中辻哲二(2004): パターン認識を用いた海洋短波レーダの流速推定法の提案, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1421-1425.