

海洋レーダー観測システムで用いる基線付近流速場の補間・推定手法

山下, 義幸
九州大学大学院総合理工学府

増田, 章
九州大学応用力学研究所

吉川, 裕
九州大学応用力学研究所

丸林, 賢次
九州大学応用力学研究所

他

<https://doi.org/10.15017/3546>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 126, pp.47-56, 2004-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

海洋レーダー観測システムで用いる 基線付近流速場の補間・推定手法

山下 義幸*1 増田 章*2 吉川 裕*2
丸林 賢次*2 石橋 道芳*2 奥野 章*2

(2004年1月30日受理)

Interpolation and estimation method of velocity field near the baseline used in the ocean radar system

Yoshiyuki YAMASHITA, Akira MASUDA, Yutaka YOSHIKAWA,
Kenji MARUBAYASHI, Michiyoshi ISHIBASHI and Akira OKUNO

E-mail of corresponding author: *yamayosi@riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

This paper describes the method of estimating the velocity field near the baseline of two ocean radars. Since a single radar measures only radial components of surface current velocities, velocity vectors are determined using the radial velocities measured by two or more radars. However, in composition of the velocity vectors, the measurement errors included in the radial velocities are enlarged where the beams of the two radars are nearly parallel to each other. Thus wild velocity vectors often appear near the baseline. Such velocities are ignored usually. In order to avoid this difficulty, we develop two methods of estimating current velocity vectors near the baseline using the nearby velocity vectors and radial velocities measured by the radars. One method is named the Azimuthal Component Interpolation Method (ACIM), and the other is named the Optimal Vector Interpolation Method (OVIM). The former is applicable only near the baseline, whereas the latter may be extended to more general interpolation and extrapolation. First these two methods are tested qualitatively and quantitatively based on a simple simulation of radar measurement. The current field calculated by ACIM and OVIM are correlated well with the true current field, whereas the ordinary algorithm fails to reproduce the true current field near the baseline. Then the two methods are applied to the real data of the Tsushima Strait. The resulting current field seems realistic and reasonable. Thus the two methods are of some practical use for estimating the current velocity vectors near the baseline, though much more improvement is needed for more general and more accurate application.

Key words : *ocean radar, ocean surface current, baseline, interpolation and estimation*

1. はじめに

日本海は、太平洋や大西洋といった大洋と比べるとごく小さい。そのため大洋に比べて細かい観測が容易で、精密な数値モデルを利用することができる。また、日本海には黒潮や親潮に似た流れもあり、亜熱帯と亜寒帯の水の境目である極前線も発達しているため、太平洋の縮小版と考えることができる。したがって、ミニチュア大洋である日本海を研究することによって世界中の海に応用できる知見が得られる

可能性がある。海洋の現象を研究する上で、まず境界条件、つまり海の出入り口での水の流入・流出状況を把握する必要がある。日本海の出入り口は狭く水深も浅い対馬・津軽・宗谷海峡しかなく、半閉鎖海域であるため大洋に比べて境界条件を押さえやすいという利点もある。ただし、従来の定点観測や船舶観測では時間・空間的に密なデータを得ることは難しい。これに対し、短波海洋レーダーを用いた観測では、広範囲の表層海流を一度に観測することができ、時間的にも連続した観測をおこなうことができるため、近年国内外で開発・導入が進められてい

*1 九州大学大学院総合理工学府

*2 九州大学応用力学研究所

る。その一例として、Takeoka et al. (1995)¹⁾がおこなった豊後水道における急潮の観測がある。海洋レーダーは空間的・時間的に密な観測ができることが利点であるが、ようやく実用段階に入ったところであり、海洋レーダーの運用法およびデータ解析手法は確立していないと考えられる。海洋レーダーを信頼でき実用に耐える海況監視手段とするためには、まず海洋レーダー計測技術の抱える問題点を洗い出し、その問題を解決するための研究および技術開発をおこなっていく必要がある。

現在、力学シミュレーション研究センターでは海洋レーダーを用いて対馬海峡表層海流を監視している。この事業研究には時間・空間的に連続した流速場を三年間取得するという目標がある。すなわち、欠測のない（少ない）流況監視をおこない海洋学上有用な時系列データを得るという目標である。この目標を実現する上での障害の一つに、対馬海峡に配備したクロスループアンテナ方式のレーダーでは視線方向流速そのものですが、監視海域の一部（不定）に欠測点が生じやすいということがある。この点で視線方向流速についてはほとんど欠測点のなかった従来のフェーズドアレイアンテナ方式と異なる。当然、流速ベクトルの欠測点発生につながるため大きな問題となっている。

もう一つの困難に、基線領域という特定の領域に関する問題がある。後述するように、一基の海洋レーダーは流速ベクトルの視線方向成分しか計測できない。そのため二基以上のレーダーで測定した視線方向流速を用いて流速ベクトルを合成しなければならない。基線とは二基の海洋レーダーを結ぶ直線のことをいい、基線領域とは基線付近の領域を指す。基線領域で通常の解析手法で流速ベクトルを求めると、視線方向流速のわずかな誤差が原因で基線に直交する向きに大きく引き伸ばされた非現実的な流速ベクトルを合成してしまい、信頼性のある流速ベクトルを求めることができない。この困難は海洋レーダーの計測原理に起因するもので、どの方式の海洋レーダーでも避けられない問題である。そのため、視線方向流速の計測自体には特に問題がないにもかかわらず、基線領域の流速ベクトルは信用できないものとして棄却している。しかし、海峡を挟む二点から海峡部を海洋レーダーで観測する場合に明らかなように、基線領域は監視対象海域の中心部をなすことが多く、その基線領域が空白の欠測域となることは大きな問題である。

上記の問題の実例を Fig. 1 に示す。所々に流速ベクトルの欠測点がある。また Radar 1（福岡県志賀島）と Radar 2（長崎県壱岐）とを結ぶ基線付近には、基線に直交する向きの非常に大きな流速が現われている。通常の解析手法では欠測はそのままであり、異常な流速が出る基線領域は最初から欠測扱いである。それでも、基線領域を含む広い海域で時間・空間的に連続した流速場を求めたい。この要請から、流速場全体を無理なく、自動的に、大量に推定するという課題が出てくることになる。

本研究では、以上の諸課題のうち、特に基線領域の問題に焦点を当てて、通常は捨てられている計測データを活かしながらか流速場を補間的に推定する手法の開発を試みた。

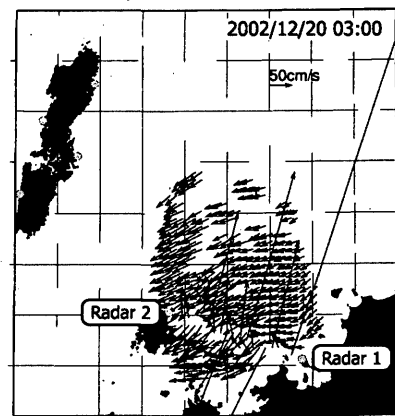


Fig. 1 An example of the current field synthesized by the ordinary algorithm based on the radial velocities measured by HF radars. There are wild vectors near the baseline drawn between Radar 1 and Radar 2.

2. 海洋レーダーによる海流計測

2.1 海洋レーダーによる海流計測の原理

海洋レーダーを用いた海流の計測原理を簡単に述べる。詳細は藤井・徳田 (2001)²⁾などの文献を参照されたい。

海洋レーダーでは特定周波数帯の電波を海面へ発信し、Braggの散乱条件を満たす海面波（風波）が後方散乱する電波を受信する。Braggの散乱条件を満たす波は、レーダー送信波の波数の2倍の波数をもつ海面波であり、レーダーの視線方向に伝播する。このためレーダーはドップラー効果を受けた散乱電波を受信することになる。レーダー受信波のドップラースペクトル（ドップラー効果による周波数の変

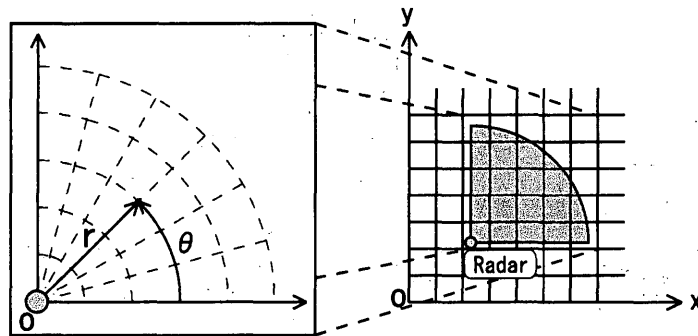


Fig. 2 Polar coordinates used for radar measurement and Cartesian coordinates used for the practical mapping of the current field.

化に対するスペクトル)には, 上述の Bragg 散乱が鋭いピークとなってあらわれる. このピークの位置(周波数のずれ)は海面波の伝播速度(位相速度)に海面波が乗っている表層海流の流速のレーダー視線方向成分を加えた速度に対応している. Bragg の散乱条件を満たすことから, 後方散乱を起こす海面波の位相速度は既知であるため, ドップラースペクトルのピーク位置からレーダー視線方向流速を推定することができる.

1基のレーダーでは, 表層海流の視線方向成分(スカラー)しか計測できない. ある地点の流速ベクトルを得るためには, その点を二基以上のレーダーで計測し, 得られた二つ以上の視線方向流速成分から流速ベクトルを求めるという方法が用いられる.

以上が海洋レーダーによる海流計測の原理である.

2.2 格子系

海洋レーダー観測システムでは Fig. 2 に示すような格子系を用いる.

レーダーの計測データは Fig. 2 左図のようなレーダーを中心とした極座標(レーダー格子)上に格納される. レーダー格子上で半径方向を視線方向, 円周方向を周回方向といい, ここでは表層海流の各成分をそれぞれ視線方向流速, 周回方向流速と呼ぶこととする. レーダーではこの視線方向流速を計測することになる. 流速ベクトルの解析および可視化には, 通常 Fig. 2 右図のような矩形格子(解析格子)を用いる.

流速ベクトルは各レーダーの視線が交差する点でそれぞれのレーダーが計測した視線方向流速を合成して求めるが, 各レーダーのレーダー格子の格子点は一般には一致せず, レーダー格子と解析格子でも格子点は一致しないため, 補間により視線方向流速

を置き換える必要がある.

2.3 ベクトル合成

2基のレーダーの視線が交差する点の流速ベクトルを Fig. 3 のように配置した2基のレーダーで計測して得た視線方向流速から合成する場合を例としてベクトル合成を説明する.

i 番レーダーの視線方向を θ_i , 視線方向流速を V_{r_i} , 単位方向ベクトルを $e_i = (\cos \theta_i, \sin \theta_i)^T$ とすれば, 合成後の流速ベクトル V と視線方向流速の関係は以下のようなになる (T は転置).

$$V_{r_i} = V \cdot e_i \quad (1)$$

視線方向流速を $V_r = (V_{r_1}, V_{r_2})$, 単位方向ベクトルを $R = (e_1, e_2)$ と置き換えると上式は,

$$V_r = V \cdot R \quad (2)$$

となる. 2基のレーダーの視線が完全に平行となる

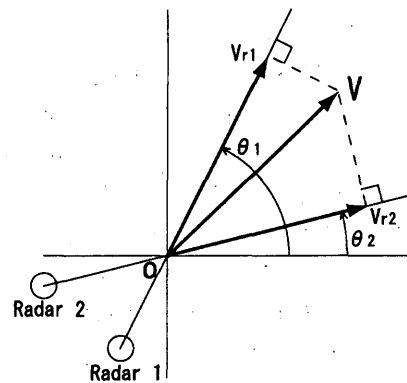


Fig. 3 Geometrical relation among the radial velocities V_{r_1} and V_{r_2} , and current velocity V .

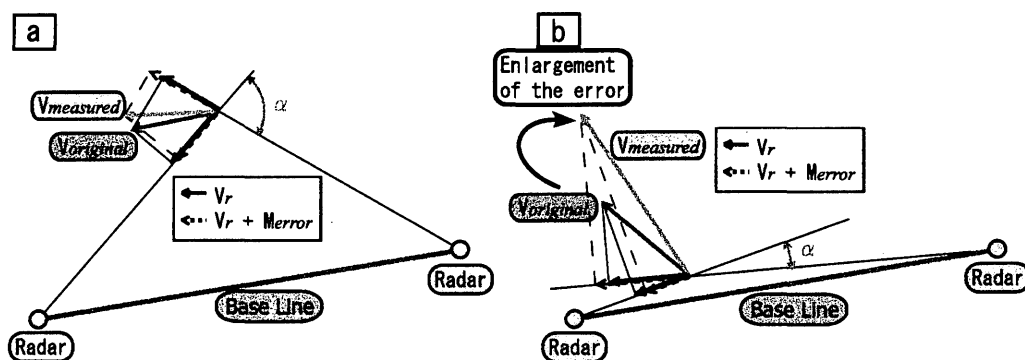


Fig. 4 Growth of the vector determination error with decrease of $\sin \alpha$. Where α denotes the angle between the intersecting radar beams. (a): the case of $\sin \alpha \sim 1$. (b): the case of $\sin \alpha \sim 0$ ($\alpha \sim 0^\circ$).

基線上を除けば、逆行列 R^{-1} を定義でき、

$$V = V_r \cdot R^{-1} \quad (3)$$

より、流速ベクトル V を計算することができる。

したがって、流速ベクトル V の東向き成分を u 、北向き成分を v とすると、各成分はそれぞれ以下のようなになる。

$$u = \frac{V_{r1} \sin \theta_2 - V_{r2} \sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (4)$$

$$v = \frac{-V_{r1} \cos \theta_2 + V_{r2} \cos \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (5)$$

3. 基線付近で異常流速が生成される理由

基線付近において異常流速が生成される理由について簡単に説明する。

海洋レーダーで計測できる視線方向流速には基本的に計測誤差が含まれる。ベクトル合成後の表層流速に含まれる誤差は、各視線方向流速に含まれる計測誤差の投影分としてあらわれる。この表層流速に含まれる誤差の大きさは、レーダーとその計測点との幾何学的な位置関係によって決まり、レーダー視線のなす角が 90° のときに最も小さく、それ以上でもそれ以下でも大きくなる。Fig. 4 にその様子を示す。 $V_{original}$ は計測点における本来の流速であり、これを各レーダーで観測して得られる視線方向流速は V_r のようになる。この V_r に計測誤差 M_{error} が含まれているとすると、計測誤差を含んだ視線方向流速を合成して得られる流速ベクトルは $V_{measured}$ のようになる。Fig. 4 (a) のようにレーダーの視線のなす角 α が 90° に近く $\sin \alpha \sim 1$ の場合、計測誤差による流速ベクトルの引き伸ばしの影響は小さく、 $V_{original}$ と $V_{measured}$ の差異はわずかである。これに対して、Fig. 4 (b) のように $\sin \alpha$ の値が 0 に近い場合は、視

線方向流速に含まれる計測誤差が同程度であるにもかかわらず流速ベクトルが基線に直交する方向に引き伸ばされ、 $V_{measured}$ は $V_{original}$ と大きく異なるものになってしまう。

以上の理由により、基線付近ではレーダーの視線が平行に近づくため計測した視線方向流速に含まれる計測誤差の拡大を生じ、基線に直交する向きに引き伸ばされたような異常流速が生成される。より詳細な議論は R.D.Chapman et al. (1997)³⁾, Nadai et al. (1999)⁴⁾ などの文献を参照されたい。

4. 表層流速場補間・推定手法

本研究において開発した 2 種類の表層流速場推定手法について説明する。

開発中の各手法はそれぞれ、周回方向流速補間法と最適ベクトル補間法と呼称することにする。

4.1 周回方向流速補間法

周回方向流速補間法 (ACIM: Azimuth Component Interpolation Method) の流速ベクトル推定原理について説明する。

流速ベクトルを合成するためには、2 つの独立した情報が必要であり、通常解析では 2 基のレーダーで計測した視線方向流速を合成して流速ベクトルを求めるが、前述のとおり、2 基のレーダーの視線のなす角が空間的に変化するため基線付近などでは計測誤差の拡大を生じ、流速ベクトルの合成がうまくいかない。

そこで、通常解析では流速ベクトルを合成できない地点、すなわち基線付近でも流速ベクトルを推定する手法として、視線方向流速と周回方向流速を用いて流速ベクトルを推定するという手法が考えられる。視線方向流速はレーダーで計測しているの

既知である。周回方向流速は通常の解析で得られる流速ベクトルを視線方向成分と周回方向成分とに分解することで得られる。当然、基線付近では異常な周回方向流速になってしまうので、これをレーダー格子上で周囲の情報から補間によって求める。こうして求めた周回方向流速と視線方向流速とを合成することにより、基線付近の流速ベクトルを推定することができる。ACIMでは、視線方向と周回方向が常に直交するため、計測誤差の拡大の影響を小さくすることができる。周回方向流速はそれぞれのレーダー格子上で求めることになるため、2基のレーダーを用いる場合、最終的に同一の解析格子点上に2つの流速ベクトルが推定される。現段階では、これらの流速ベクトルを各々のレーダー局からの距離で重みを付けて混ぜ合わせている。

以上が周回方向流速補間法 (ACIM) の原理である。

4.2 最適ベクトル補間法

最適ベクトル補間法 (OVIM: Optimal Vector Interpolation Method) の流速ベクトル推定原理について説明する。

OVIMでは、解析格子上で基線付近や欠測点の流速ベクトルを周囲の情報を用いて調和補間で推定する。この手法は調和補間で流速ベクトルを推定する際に、指定された点とそれに隣り合う3点の視線方向流速を参照して、それらに適合するように流速ベクトルを調節する機能を有する。

この手法の適用領域としては、複数のレーダーの視界内の点と1基のレーダーの視界にしか入っていない点、どのレーダーの視界にも入っていない点および欠測点の3つの領域がある。複数のレーダーの視界に入っている点ではそれぞれの視線方向流速を最もうまく説明できる流速ベクトルを推定する。視線方向流速が計測されている点の内、片方のレーダーの視界にしか入っていない点では、片方のレーダーの視線方向流速しか参照されないため信頼性は劣るが、複数のレーダーの視界に入っている領域の近辺では調和補間により周囲になじんだ流速ベクトルを推定することもできる。どのレーダーの視界にも入っていない点および欠測点には視線方向流速の情報がないので補間で埋めるだけになる。OVIMでは以下のような式を解析格子上で差分化し、緩和法で解く。

$$0 = \nabla^2 \mathbf{u} + w_F \cdot \mathbf{F} + w_N \cdot \mathbf{N} \quad (6)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}(V_{r_{near}}) \quad (7)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{f}(\theta_{near}) \cdot \mathbf{V}_{near} \quad (8)$$

式(6)右辺第2項は指定された解析格子点と、その点を南西点とする直近の3つの格子点の視線方向流速 $V_{r_{near}}$ を考慮する項である。右辺第3項は指定された解析格子点を中心とし、それを囲む8点に右辺第2項による流速ベクトルの調整の影響を作用させるための項である。右辺第2, 第3項それぞれの係数 w_F , w_N は各項の重みをあらわすものである。式(8)中の θ_{near} は、指定格子点およびその近傍8点それぞれにおけるレーダー視線の方位角をあらわす。現状では、この重み w_F , w_N を内部的に決定する仕組みが未完成で手動による調整が必要であるという問題がある。

以上が最適ベクトル補間法 (OVIM) の原理である。

5. 検証

開発した流速場推定手法の検証を以下の要領でおこなった。

はじめに計算機上の仮想海盆に仮想流速場を設定し、これを2基のレーダーで模擬観測して視線方向流速を求める。模擬観測の際に、視線方向流速にランダムな誤差を含ませておく。これは実際の観測における計測誤差を想定したものである。模擬観測して得た視線方向流速を合成して流速ベクトルを求め、この流速場に対して流速場推定手法を適用しその効果を定性的・定量的に検証する。

Fig. 5に設定した仮想流速場 ($\mathbf{V}_{original}$) を示す。矢印は各解析格子点における流速ベクトルをあらわしている。

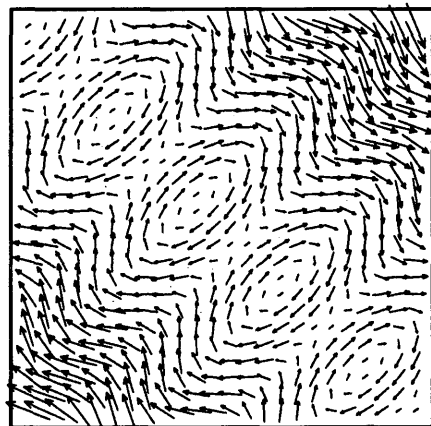


Fig. 5 An artificial velocity field used for the test of newly developed algorithms of ACIM and OVIM for estimation of the current velocity vectors near the baseline of two radars.

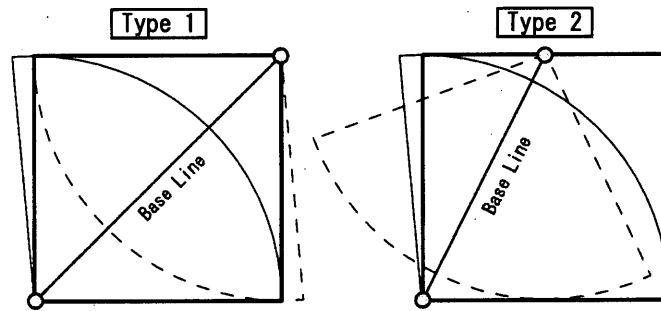


Fig. 6 Configurations of the two radars that measure the velocity field of Fig. 5. Type 1 (left) and Type 2 (right). Circles show the radars; and sectors the field of view of each radar.

模擬観測に用いるレーダーの配置を Fig. 6 に示す。Fig. 6 中の円は設置したレーダーの位置をあらわしており、それぞれのレーダーを中心とする扇形はそれぞれのレーダーの視界をあらわしている。

5.1 定性的検証の結果

模擬観測で得られた流速場 ($V_{measured}$) に各推定手法を適用し、定性的な検証をおこなった結果について述べる。

Fig. 7 に模擬観測の結果と各手法を適用した結果を示す。左列はレーダー配置 Type 1 の場合、右列は Type 2 の場合の結果である。上段は模擬観測後の流速場 ($V_{measured}$) であり、中断は $V_{measured}$ に周回方向流速補間法 (ACIM) を適用した結果 (V_{ACIM})、下段は中断と同じく $V_{measured}$ に最適ベクトル補間法 (OVIM) を適用した結果 (V_{OVIM}) である。

2 基のレーダーの視界が重なる領域では流速ベクトルを合成できるが、それ以外の片方のレーダーの視界にしか入っていないところでは、流速ベクトルの合成ができないため、視線方向流速を表示させている。2 基のレーダーの視界が重なる領域の基線付近で計測誤差のため、基線に直交する向きに引き伸ばされた流速ベクトルが生成されているのが確認できる。このような異常流速が生成される領域を基線範囲としてこの領域に ACIM と OVIM の 2 つの手法を適用して流速ベクトルを推定する。基線範囲は基線を中心として $\pm 15^\circ$ の範囲に設定した。

中段の V_{ACIM} および、下段の V_{OVIM} のどちらも $V_{measured}$ と比較すると、基線付近に存在した異常（基線に直交する向き）の流速が消え、その周囲と整合性のある流速ベクトルを推定できており、定性的に良好な結果が得られた。

また、 V_{OVIM} について 2 基のレーダーの両方の視界外の領域と片方のレーダーの視界にしか入って

いない領域で流速ベクトルを推定しているが、これは補間によって作られたものである。片方のレーダーの視界にしか入っていない領域では、参照すべき情報が 1 基分の視線方向流速のみになるため、両方のレーダーの視界に入っている領域から離れるほど、流速ベクトルの向きが視線方向流速そのものに近づいていっている。両方のレーダーの視界に入っていない領域では、補間のみで流速ベクトルを推定するため、こちらも両方のレーダーの視界に入っている領域から遠ざかるほど信頼性は低下していく。

5.2 定量的検証の結果

前節において 2 つの流速場推定手法とともに定性的に良好な結果が得られたため、次に各手法の効果を定量的にみるために、仮想流速場 ($V_{original}$) との相関を調べた結果を述べる。相関は各流速場について基線範囲内の解析格子上的流速ベクトルを基線に平行な成分と、基線に直交する成分とに分解してそれぞれの成分について調べた。

始めに、 $V_{original}$ と $V_{measured}$ についての散布図を Fig. 8 に示す。左列は基線に平行な成分についての散布図であり、右列は基線に直交する成分についての散布図である。また、上段はレーダー配置 Type 1、下段は同 Type 2 についてのものである。基線に平行な成分では $V_{original}$ と $V_{measured}$ との相関係数はレーダー配置 Type 1、Type 2 それぞれ 0.9819 と 0.9339 で相関が高いが、基線に直角な成分については相関係数が -0.0514 と 0.0427 であり相関が非常に低くなっている。このことは 2 基のレーダーの視線が平行に近づく基線付近において、視線方向流速に含まれる計測誤差がベクトル合成の際に拡大され流速ベクトルが基線に直交する向きに引き伸ばされてしまう問題を端的に示すものである。

次に、 $V_{measured}$ に流速場推定手法 ACIM を適用

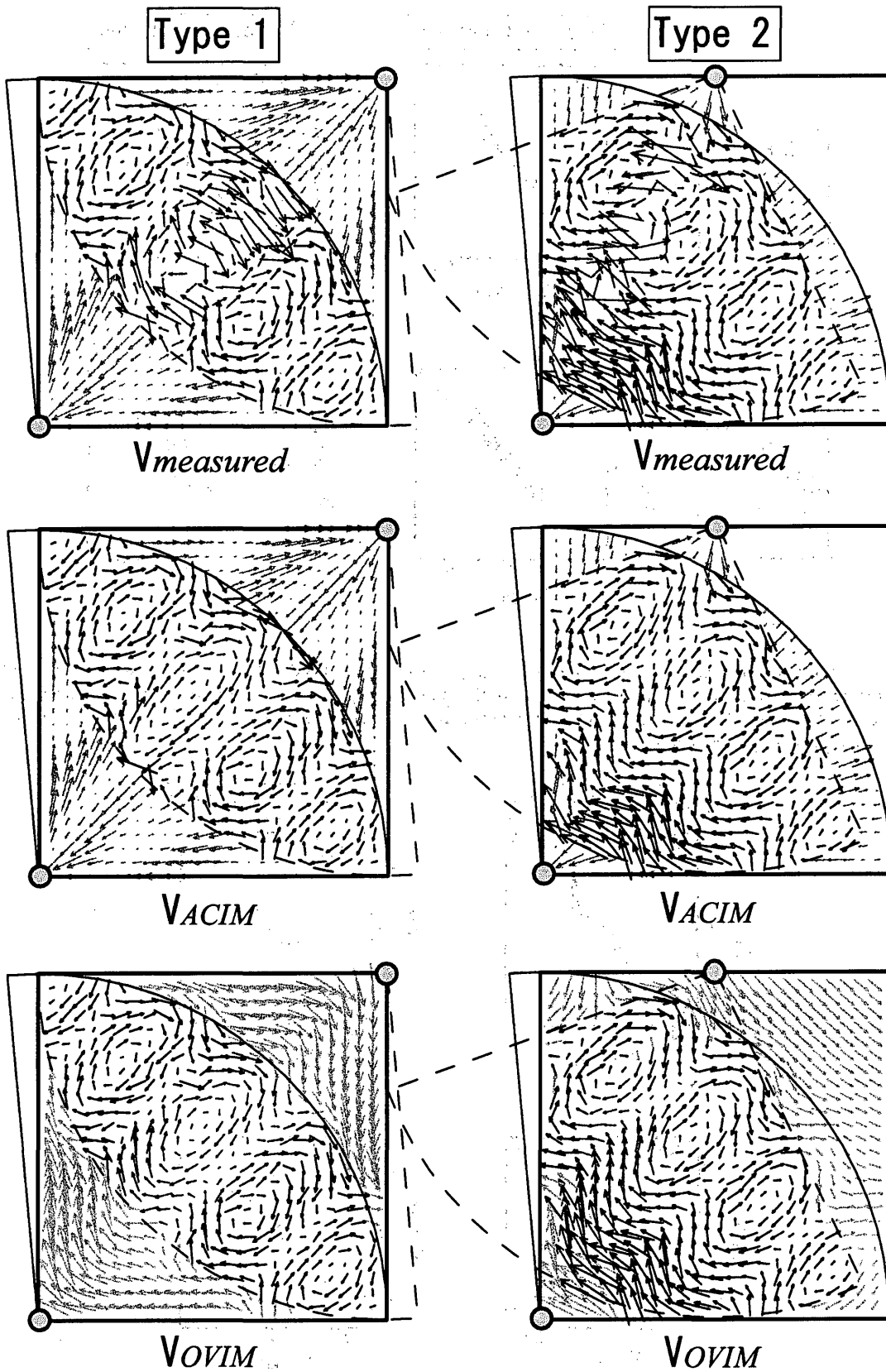


Fig. 7 Current fields synthesized by three algorithms based on the same data obtained by two radars: configurations Type 1 (left) and Type 2 (right). The current field in the baseline area is made up using the ordinary algorithm (top panels), ACIM (middle panels), and VOVIM (bottom panels).

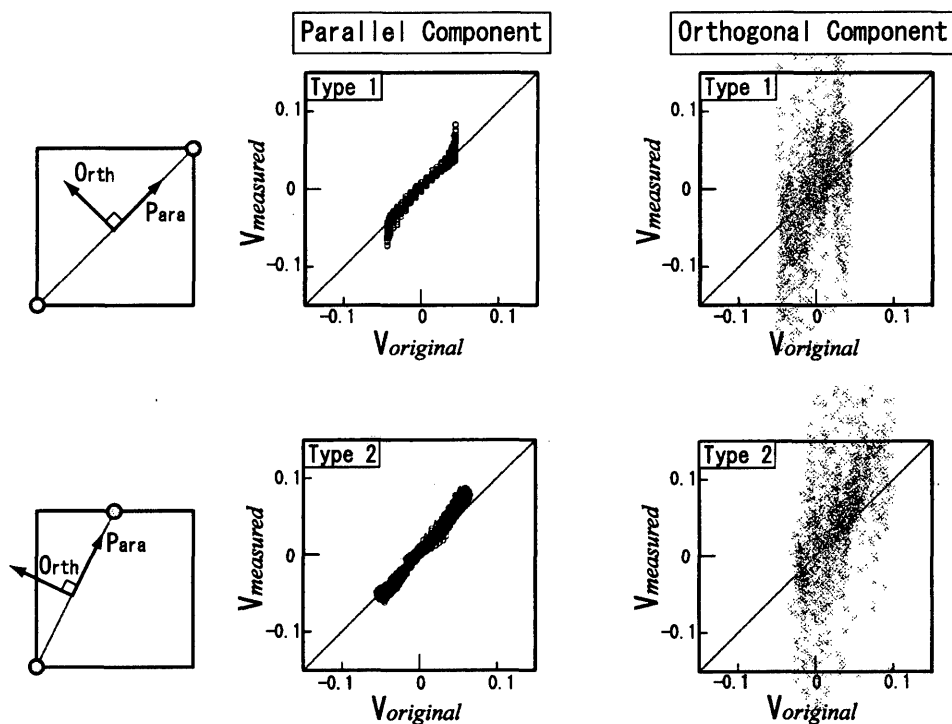


Fig. 8 Comparison between the given velocities ($V_{original}$) and measured velocities by radars using ordinary algorithm ($V_{measured}$). Upper panels show the case of Type 1 radar configuration, and lower panels show the case of Type 2. Left: velocity component parallel to the baseline. Right: velocity component orthogonal to the baseline.

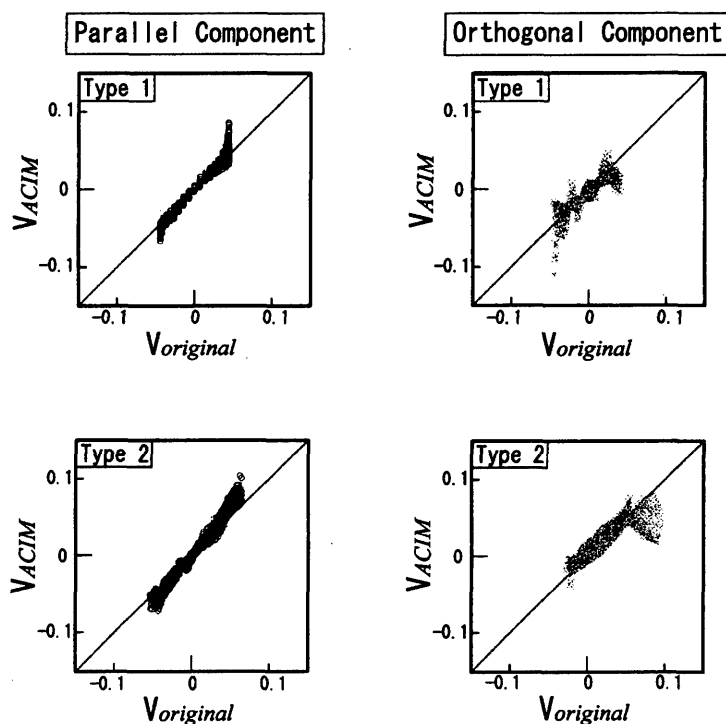


Fig. 9 Comparison between the given velocities ($V_{original}$) and estimated velocities by the ACIM (V_{ACIM}). Upper panels show the case of Type 1 radar configuration, and lower panels show the case of Type 2. Left: velocity component parallel to the baseline. Right: velocity component orthogonal to the baseline.

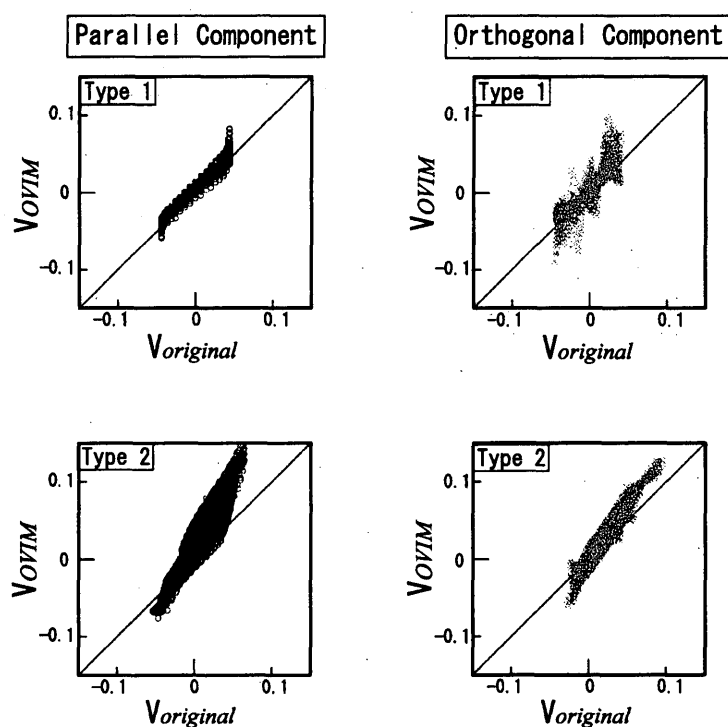


Fig. 10 Comparison between the given velocities ($V_{original}$) and estimated velocities by the OVIM (V_{OVIM}). Upper panels show the case of Type 1 radar configuration, and lower panels show the case of Type 2. Left: velocity component parallel to the baseline. Right: velocity component orthogonal to the baseline.

| | Parallel Component | | | Orthogonal Component | | |
|--------|--------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | measured | ACIM | OVIM | measured | ACIM | OVIM |
| Type 1 | 0.9819 | 0.9827 | 0.9750 | -0.0514 | 0.8645 | 0.8439 |
| Type 2 | 0.9846 | 0.9836 | 0.9504 | 0.0377 | 0.8608 | 0.9464 |

Table 1 Correlations of the velocity component estimated by the three algorithms with the true velocity component.

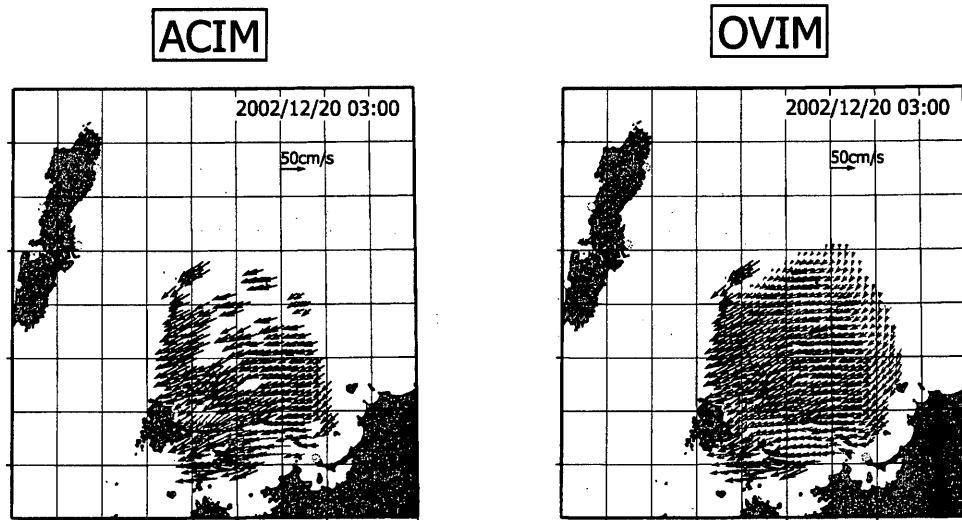


Fig. 11 An example of practical application of ACIM and OVIM to radar observation data that has been deployed for monitoring the sea surface current in the Tsushima Strait.

した場合の $V_{original}$ との散布図を Fig.9 に、OVIM を適用した場合のものを Fig. 10 に示す. Fig. 8 と同じく左列は基線に平行な成分について、右列は基線に直交する成分について、上段はレーダー配置 Type 1, 下段は Type 2 の場合の結果である. 各散布図の相関係数の値は Table. 1 に示すとおりであった. ACIM, OVIM とともに基線に直交する成分についての相関が高くなり、相関係数の値も基線に平行な成分のものと同程度になっていることが確認できる.

6. 実測データへの適用結果

開発した周回方向流速補間法 (ACIM) と最適ベクトル補間法 (OVIM) の 2 つの流速場推定手法を実際のレーダー観測で得られた流速場 (Fig. 1) に適用した例を Fig. 11 に示す. 各流速場推定手法によって推定された流速ベクトルを灰色の矢印であらわしている. Fig. 1 と比較して、ACIM, OVIM とともに基線付近で周囲の流速と違和感のない流速ベクトルを推定できていることが確認できる.

7. おわりに

本研究では海洋レーダーを用いた表層流速場観測において基線付近で流速ベクトルを合成できないという計測手法上不可避的な問題を解決するための一般的な手法を開発し、その定性的・定量的検証をおこなった結果について述べた. 周回方向流速補間法と最適ベクトル補間法の 2 つの流速場推定手法につい

て定性的・定量的検証をおこない、両手法とも基線付近において妥当な流速場を観測データを用いて推定することができることを確認した.

参考文献

- 1) Hidetaka Takeoka, Yoshio Tanaka, Youichi Ohno, Yukiharu Hisaki, Akitsugu Nadai and Hiroshi Kuroiwa: Observation of the Kyucho in the Bungo Channel by HF Radar, *J. Oceanography*, Vol. 51, (1995) 699-711.
- 2) 藤井 智史, 徳田 正幸: HF レーダーによる観測, 陸上設置型レーダーによる沿岸海洋観測, 土木学会, (2001) 68-89.
- 3) R. D. Chapman, L. K. Shay, H. C. Graber, J. B. Edson, A. Karachintsev, C. L. Trump and D. B. Ross: On the accuracy of HF radar surface current measurements: Intercomparisons with ship-based sensors, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86(C8), (1997) 18,737-18,748.
- 4) Akitsugu Nadai, Hiroshi Kuroiwa, Masafumi Mizutori and Shin'ichi Sakai: Measurement of Ocean Surface Current by the CRL HF Ocean Surface Radar of FMCW Type. Part2. Current Vector, *J. Oceanography*, Vol. 55, (1999) 13-30.