

## 風速場の非線形性による MVVP 法の推定誤差について

佐々木佳明\*・真木雅之\*・岩波 越\*\*

### Error Analysis of the MVVP Method Applied to Nonlinear Wind Field

By

Yoshiaki SASAKI\*・Masayuki MAKI\*・Koyuru IWANAMI\*\*

\**Atmospheric and Hydrospheric Science Division,*

\*\**Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies,*

*National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*

#### Abstract

A variety of techniques have been used to retrieve three-dimensional wind fields from single-Doppler radar wind measurements until now. The VVP (Volume Velocity Processing) method and the MVVP (Modified VVP) are techniques to estimate kinematic properties of the three-dimensional wind fields. It is assumed that the Cartesian wind components  $u$ ,  $v$  and  $w$  vary linearly within the analysis volume. Actual wind field, however, has nonlinearity and discontinuity, which may cause estimation errors when applying the VVP or the MVVP method to actual radar data. Until now, it has not been clear at what threshold value the MVVP is able to make good estimations for wind fields which have nonlinearity.

In this study, we investigated the relationship between nonlinearity and the estimation errors for wind fields retrieved by the MVVP method, using observation and synthesized data which have nonlinearity. The results show that the MVVP method is able to estimate three dimensional wind fields with good accuracy, until nonlinearity (second derivative) exceeds  $10^{-7}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  order.

**Key words :** Doppler radar, MVVP, Analysis method

#### 1. はじめに

ドップラーレーダの観測データから求められた三次元的な風速場は、災害をもたらす激しい大気現象の構造を解明するうえで極めて重要な情報である。また、水平風速、水平発散場の分布は、数値予報の精度向上や気象災害の予報などの面でも極めて重要な情報である。

このため、三次元的風速場を求める解析法が多数開発され、利用されてきた。たとえば、デュアル解析(Armijo, 1969) や、Modified VVP 法(MVVP 法, Koscielny *et al.*, 1982) などがそうである。なかでも、デュアル解析は、極めて高い精度で風速場を推定が可能な為、多くの研究

で使用される解析法である。しかし、デュアル解析は解析領域が制限される、解析に時間がかかる、複数台のレーダを小さな領域に配置しなければならないのでコストがかかる、といった制約が多数存在する。これに対し、一台のドップラーレーダ観測から風速場を推定する MVVP 法では、デュアル解析にみられる制約がなく、広範囲にわたってリアルタイムにデータ解析を行えるという大きな利点がある。

この利点に注目して、Koscielny *et al.* (1982) や、Smith and Rabin (1989 b) などは、プレストームにおける発散場の水平分布を MVVP 法によって調べた。また近年、高山 (1997 年気象学会春季大会) は、数値予報の初期値に VVP 法により求められた三次元的な風速場を使用することで、予報の精度を向上させる試みをしている。

\*防災科学技術研究所 気圏・水圏地球科学技術研究部  
\*\*長岡雪氷防災実験研究所

この時、問題になるのは、MVVP法が観測された風速場を線形であると仮定して風速場を推定している点である。しかし、実際の風速場は非線形性を持っているので、線形性を仮定したMVVP法を現実の大気現象に適用すると大きな推定誤差を発生させる可能性がある。このため、どの程度の非線形性までMVVP法が精度の良い推定を行えるかを知ることは、MVVP法を現実の大気現象に適用する際に必要な情報である。

この観点から、MVVP法あるいは、VVP法について適用限界を調べた研究例は、Waldteufel and Corbin (1979)の研究例があるのみである。しかし、彼らは、鉛直次元に対する推定を行う方法の適用限界を示したのみで、風速場の水平分布を推定した場合の適用限界を示していない。また、これまで非線形性を持つ風速場にMVVP法を適用した場合の推定誤差の空間パターンを示した研究例はない。

今回、我々は非線形性の強いシヤーラインを伴う現象にMVVP法を適用し、デュアル解析の結果との比較を行った。その結果、デュアル解析の結果を真値と考えた場合、MVVP法は、非線形性が小さな領域では推定精度の良い結果を得られるが、非線形性の集中するシヤーライン上において非常に大きな推定誤差を発生することが分かった。この結果は、MVVP法の推定誤差が風速場の非線形性に比例して大きくなる傾向にあることを示している。すなわち、MVVP法は、ある大きさの非線形性までなら十分な精度を持った風速場の推定を行えることを示している。

そこで、本研究では、真の風速場を知ることができる数値シミュレーションによって、非線形性を持つ風速場にMVVP法を適用した時の推定誤差の特徴、空間分布を調べた。また、非線形性の大きさを任意に変化させた実験により、風速場の非線形性の大きさとMVVP法の推定誤差の関係を調べた。この時、数値シミュレーションには、空間的に一様に非線形を加えた風速場モデルと、ある領域に限り非線形性を加えた風速場モデルを用いた。これにより、空間的に広く非線形性が分布する現象と、狭い領域に局在した現象の風速場にMVVP法を適用した際の推定誤差の特徴、空間的分布を調べることができた。

## 2. MVVP法について

ドップラー速度のデータは、実際の風速のレーダに向かってくる方向成分のみを測定している。VVP法及びMVVP法は、風速場が線形に変化することを仮定して、ドップラー速度のデータから風速場を最小二乗法を用いて推定する手法である。

VVP法は、解析に使用するデータが含まれる領域(解析領域(Fig.1参照))を三次元的に設定して、ドップラーレーダの観測でよく行われるボリュームスキャン(異なる仰角を持つ円錐状の走査を複数行う観測法)で得られたデータの内、解析領域内に含まれる全観測データを使って風速場を推定する(Volumeのデータを使って風

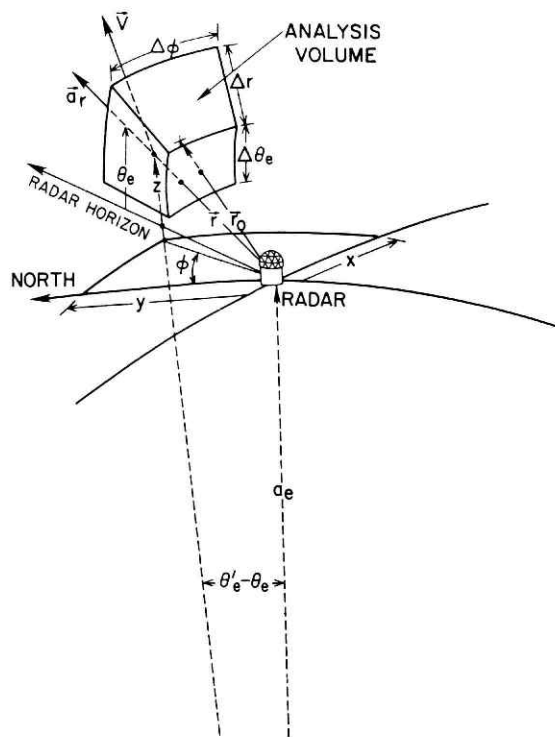


図1 MVVP法の概念図

Fig. 1 Schematic figure of the MVVP method.

速場の推定を行うので、Volume Velocity Processingの名前になっている)。したがって、含まれる観測データは三次元的になり、最大11個の風速場のパラメータを推定できる。

MVVP法は、VVP法と同様にボリュームスキャンの全データを用いて風速場の推定を行うが、地表付近における風速場の推定を目的とし、鉛直流に関するパラメータは無視できるほど小さいと仮定している。つまり、MVVP法はVVP法から鉛直流に関するパラメータを取り除き、風速場について7個のパラメータを推定する手法である。

つぎに、具体的にMVVP法についての計算手法などを説明していく。

### 2.1 MVVP法の計算手法

一般に、風速ベクトル  $\mathbf{V}=(u, v, w)$  は、テイラー展開によりある点  $\mathbf{r}_0$  での風速とその周りの微分展開項によって表現できる。

$$\mathbf{V}(\mathbf{r})=\mathbf{V}_0(\mathbf{r}_0)+\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{d r}+O(\text{higher order}) \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{r}_0$  は、 $\mathbf{r}_0=\mathbf{r}_0(x_0, y_0, z_0)$  で、テイラー展開を行う中心点である。ここで、テイラー展開を行う中心点を含むある領域を、解析領域と呼ぶことにする。今、解析領域内で風速場の線形性を仮定すると、

$$\mathbf{V}(\mathbf{r})=\mathbf{V}_0(\mathbf{r}_0)+\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{d r} \quad (2)$$

となる。ただし、 $\mathbf{d r}=(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)$  である。(2)式を各成分で表示すると、

$$\left. \begin{aligned} u &\approx u_0 + u_x(x-x_0) + u_y(y-y_0) + u_z(z-z_0) \\ v &\approx v_0 + v_x(x-x_0) + v_y(y-y_0) + v_z(z-z_0) \\ w &\approx w_0 + w_x(x-x_0) + w_y(y-y_0) + w_z(z-z_0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

である。ここで、さらに地球の曲率まで考慮して直行座標系からレーダ座標系  $(r, \theta, \phi)$  への座標変換を行う。このとき、地球の有効半径を  $a_e$  で表すと、レーダから点  $\mathbf{r}$  までの距離は、 $a_e$  に比べると非常に小さいので、

$$\left. \begin{aligned} x &\approx r \cos \theta_e \sin \phi \\ y &\approx r \cos \theta_e \cos \phi \\ z &\approx r \sin \theta_e - \frac{r^2 \cos^2 \theta_e}{2a_e} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となる。ただし、 $r$  はレーダからの距離、 $\phi$  は方位角、 $\theta$  は水平面からの仰角を表す。 $\theta_e$  は、

$$\theta_e \equiv \theta + \tan^{-1} \left[ \frac{r \cos \theta}{(a_e + r \sin \theta)} \right] \quad (5)$$

で仰角  $\theta$  についての地球の曲率を考えたときの有効仰角である。

観測から得られるドップラー速度  $v_r$  は、風速ベクトル  $\mathbf{V}$  をレーダビームの動径方向に投影した量であるから、次の式によって表現される。

$$v_r = \mathbf{V} \cdot \mathbf{a}_r \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{a}_r$  は、

$$\mathbf{a}_r \approx \hat{\mathbf{i}} \cos \theta_e \sin \phi + \hat{\mathbf{j}} \cos \theta_e \cos \phi + \hat{\mathbf{k}} \sin \theta_e \quad (7)$$

で、レーダビームの方向余弦を表す、また、 $\hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{j}}, \hat{\mathbf{k}}$  は  $x, y, z$  方向についての  $\mathbf{r}$  点での単位ベクトルである。これら、(3)–(7)式を用い、求めたい気象要素を各項にまとめていくと、11個の要素を持つ風速場のパラメータ  $\mathbf{K}$  と、観測データの位置によって決まるプレディクター  $\mathbf{P}$  を使って  $v_r$  を次の様に表すことができる。

$$v_r = \mathbf{P}_{11} \cdot \mathbf{K}_{11} + \epsilon \quad (8)$$

$\epsilon$  は誤差を表す。このとき、 $\mathbf{P}_{11}, \mathbf{K}_{11}$  は、

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{11} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e \sin \phi \\ \cos \theta_e \cos \phi \\ \cos \theta_e [r \cos \theta_e \cos \phi \sin \phi - (x_0 \cos \phi + y_0 \sin \phi)/2] \\ \cos \theta_e [r \cos \theta_e \sin \phi - x_0] \sin \phi \\ \cos \theta_e [r \cos \theta_e \cos \phi - y_0] \cos \phi \\ \cos \theta_e \left[ r \sin \theta_e - \frac{r^2 \cos^2 \theta_e}{2a_e} - z_0 \right] \sin \phi \\ \cos \theta_e \left[ r \sin \theta_e - \frac{r^2 \cos^2 \theta_e}{2a_e} - z_0 \right] \cos \phi \\ \sin \theta_e \\ \sin \theta_e \left[ r \sin \theta_e - \frac{r^2 \cos^2 \theta_e}{2a_e} - z_0 \right] \\ \sin \theta_e [r \cos \theta_e \sin \phi - x_0] \\ \sin \theta_e [r \cos \theta_e \cos \phi - y_0] \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{K} \equiv \mathbf{K}_{11} = \begin{bmatrix} u'_0 \\ v'_0 \\ (u_y + v_x) \\ u_x \\ v_y \\ u_z \\ v_z \\ w_0 \\ w_z \\ w_x \\ w_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

ただし  $u'_0 = u_0 + y_0(v_x - u_y)/2$ ,  $v'_0 = v_0 - x_0(v_x - u_y)/2$  で、求められた平均風速  $(u'_0, v'_0)$  は、ローテーションの効果によって汚染されていることに注意しなければならない。

一般的な議論をするために、風速場のパラメータが 11 個よりも少ない、 $m$  個のパラメータ ( $m < 11$ ) を推定する場合について考える。解析領域内では、 $n$  個のドップラー速度の観測がなされているので、(8)式はマトリクスを用いて次のようにまとめることができる。

$$\mathbf{V}_n = \mathbf{P}_{nm} \cdot \mathbf{K}_m + \mathbf{E}_n \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{V}_n$  は、 $\mathbf{V}_n = [v_{r1}, v_{r2}, \dots, v_{rn}]$ ,  $\mathbf{P}_{nm}$  は、 $n \times m$  マトリクス、 $\mathbf{E}_n$  は、 $\mathbf{E}_n = [\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n]$  を表す。(11)式から  $\mathbf{K}_m$  は最小二乗法における正規方程式を解く手法により、

$$\mathbf{K}_m = [\mathbf{P}_{nm}^T \mathbf{P}_{nm}]^{-1} [\mathbf{P}_{nm}^T \mathbf{V}_n] \quad (12)$$

によって求められる。また、推定されたパラメータ  $\mathbf{K}_m$  の分散  $\sigma$  は、共分散マトリクス  $\mathbf{C}_{nm}$  を用いて表すことができ、

$$\sigma(k_j) = \mathbf{C}_{jj} = [\mathbf{P}_{nm}^T \mathbf{P}_{nm}]^{-1} s^2 \quad (13)$$

$$s^2 = \frac{\mathbf{e}_j^T \cdot \mathbf{e}_j}{n-l} \quad (14)$$

$$\mathbf{e}_n = (\mathbf{V}_n - \mathbf{P}_{nm}^T \mathbf{K}_m) \quad (15)$$

となる。(14)式の  $s^2$  は、残余分散 (residual variance) と呼ばれる量で、データのばらつきの大きさを表わす量である。最小二乗法による回帰計算を行う場合、回帰データのばらつきが大きければ、計算結果は真の値からのずれが大きくなる (Press, W.H. *et al.* 1992)。ドップラーレーダの観測の場合、random noise などによって、観測データのばらつきが大きくなることが考えられる。

今まで、解析領域内の風速場が線形に変化する場合、ドップラーレーダの観測データから実際の風速場を推定するには最小二乗法を用いればよいことを述べてきた。一般に、(9)式、(12)式を用いることで、一台のドップラーレーダの観測データから風速場を求めることができる。

MVVP 法は、ある解析領域内に含まれるボリュームスキャンの全データから (9)式、(10)式を用いて地表付近

の風速場を推定する手法である。低空の風速場を推定する場合、鉛直流とその微分項( $w_0, w_x, w_y, w_z$ )は無視できるほど小さいとみなせる。この場合、最小二乗法は、パラメータ間の独立性が悪くなり、他の7つのパラメータの推定精度に悪影響を与える可能性がある。このため、低空の風速場を推定する MVVP 法では、11 個のパラメータのうち、鉛直流とその微分項( $w_0, w_x, w_y, w_z$ )を無視して、 $\mathbf{K}_7=[u'_0, v'_0, u_y+v_x, u_x, v_y, u_z, v_z]$  の 7 個のパラメータを推定する。

Koscielny *et al.* (1982) らは、7つのパラメータを用いた MVVP 法で発散場の水平分布を精度良く再現する事に成功している。4つのパラメータ( $w_0, w_x, w_y, w_z$ )を無視した事による推定誤差は、4.1 節で考察する。

## 2.2 解析領域, Outlier の除去法

MVVP 法は、ある解析領域内のドップラーレーダのデータから最小二乗法を用いて風速場を推定する手法であることを前節で述べた。このため、十分な数のデータがなければ最小二乗法の解の信頼性がそこなわれる。すなわち、大きな解析領域をとった方が、最小二乗法を行うには都合が良い。しかし、大きな解析領域をとった場合、解析領域内での風速場の線形性が損なわれてしまう。このため、適切な大きさの解析領域を設定する必要がある。

MVVP 法における適切な解析領域は、Koscielny *et al.* (1982) らや、Smith and Rabin (1989b) により議論されている。彼らの議論は、風速場を線形に限ったものであるが、方位角で  $30^\circ$ 、仰角で  $0.4^\circ$ 、レンジで 20 km の解析領域を取れば発散場で  $10^{-5}(\text{s}^{-1})$  程度の標準偏差で推定できる事を示している。また、Smith and Rabin (1989b) は、この解析領域を取る事で、 $10^{-8}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  程度の非線形性を含んだ場合にも、発散場で  $10^{-4}(\text{s}^{-1})$  程度の標準偏差を持つ推定が可能である事を示している。この標準偏差の値はメソスケール現象で代表的に観測されるオーダと同じなので、発散場の領域を正確に知る為には不十分な精度である。しかし、激しい大気現象で観測される  $10^{-3}(\text{s}^{-1})$  程度の発散場の領域を知るには十分な精度である。そこで本研究では、彼らの研究例に従い、解析領域としてを採用した。仰角は、観測の中からできるだけ差の小さい観測データを選んだ。この時、レーダ観測点から半径 10 km の範囲については解析領域が重複してしまう為、解析対象からはずしている。

つぎに、飛行機や鳥などの様に、観測データに含まれる大気運動を表す以外の反射体からのドップラー速度データ、すなわちアウトライアーを取り除く方法について述べる。このような観測データは、データのばらつきを発生させるので、MVVP 法の推定精度を悪化させる。したがって、これらのデータは、MVVP 法の計算から除外されなければならない。

このための手法は、Matejika and Srivastava (1991) に従い、以下に述べる手順で行った。まず、MVVP 法による各パラメータの推定後、(11)式を用いて推定ドップラー速度を求める。つぎに、推定ドップラー速度と観測

されたドップラー速度の比較を行う。この差が(14)式で得られる残余分散の平方根  $s$  にある定数  $c$  をかけた値以上ならば、そのデータはアウトライアーと認識される。最後に、アウトライアーのデータを除いてもう一度 MVVP 法の計算を行う。この手順を、 $s$  が  $s_{\min}$  以下になるまでくり返す。Matejika and Srivastava (1991) らによれば、 $c \approx 2.0$ 、 $s_{\min} \approx 1.5(\text{m/s})$  程度で、Outlier をうまく除去することが可能である。ここでは、 $c=2.0$ 、 $s_{\min}=1.4(\text{m/s})$  を採用した。

## 3. 1995 年 11 月 14 日の観測事例

観測データは、1995 年 11 月に羽田空港の「空港気象ドップラーレーダ・データ評価に係る比較観測及び解析」実験の期間中に発生したシャーラインの事例を使用した。MVVP 法は、防災科学技術研究所レーダ(以下防災科研レーダ)で得られたデータに適用した。また、このときの風速場の真値として防災科学技術研究所 (NIED)、気象研究所 (MRI) の二台のドップラーレーダによるデュアルドップラー観測の解析結果を用いた。これらのドップラーレーダは、25 km 離れて設置された。

11 月 14 日は、18 時 45 分の観測開始から、風向は南西風であった。その後、22 時 30 分頃から防災科学技術研究所レーダの南東方向に弱い西風の領域が現れ、北東から南西に伸びるシャーラインが形成された。シャーラインが最大に発達した 11 時 54 分の高度 500 m でのデュアル解析の結果を Fig. 2(a) に、MVVP 法の推定風速分布を Fig. 2(b) に示す。ただし、MVVP 法の結果はデュアル解析に対応した部分のみを明示している。

Fig. 2(a)を見ると、防災科研レーダの南東部分と北東部分にシャーラインに相当する風向の急変が認められる。これらは、それぞれ南西風域の北側および西側の西南西-西風の領域が広がりつつある事を反映している。Fig. 2(b)の MVVP 法の結果でもこれらのシャーラインが認められており、MVVP 法の推定が概ね良い結果を得ている事がわかる。

表 1 メソスケール現象で観測された風の非線形の項の大きさ

Table 1 typical order of magnitude of mesoscale non-linear wind parameter.

Term	Typical order of magnitude of mesoscale wind parameter
$u_{xx}, u_{yy}$	$5.0 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
$v_{xx}, v_{yy}$	
$u_{xz}, v_{xz}$	$5 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
$u_{zz}, v_{zz}$	$1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
$u_z, v_z$	$1 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
$w_{xx}$	$1 \times 10^{-10} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
$w_{xz}, w_{yz}$	$1 \times 10^{-10} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
$w_{zz}$	$5 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$

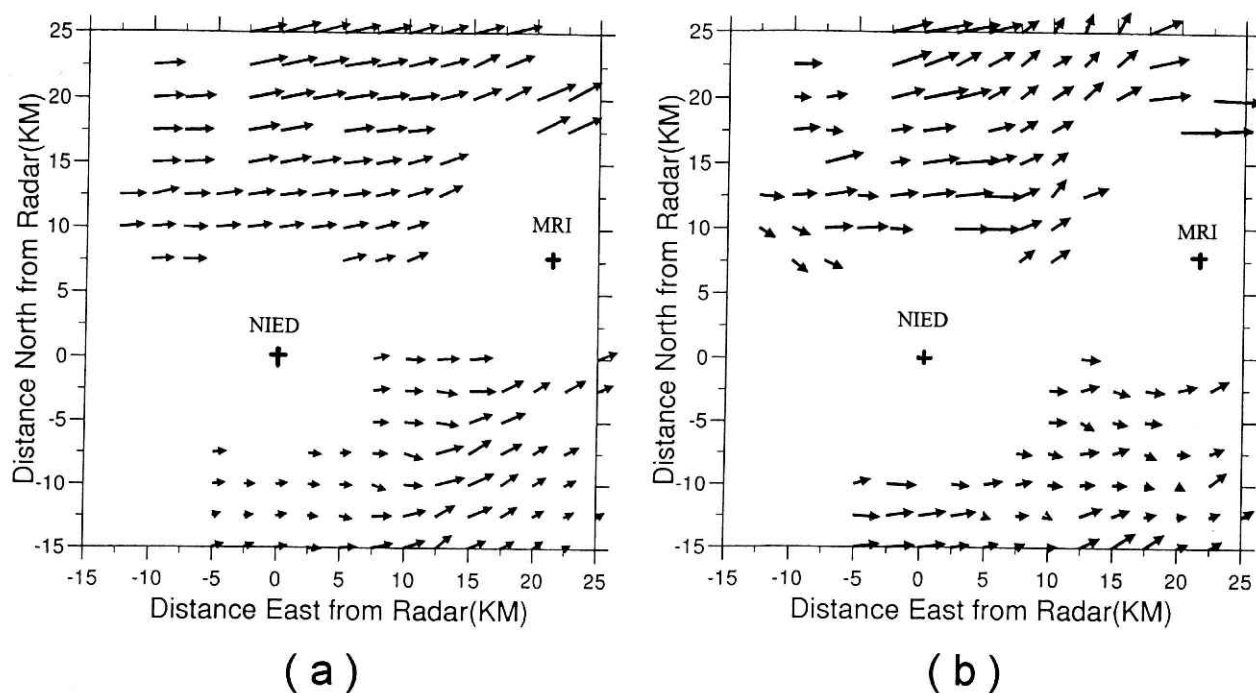


図2 (a)デュアル解析から得られた推定風速場と(b)MVVP法から得られた推定風速場。

Fig. 2 Estimated wind field retrieved from (a) dual analysis and (b) the MVVP method, respectively.

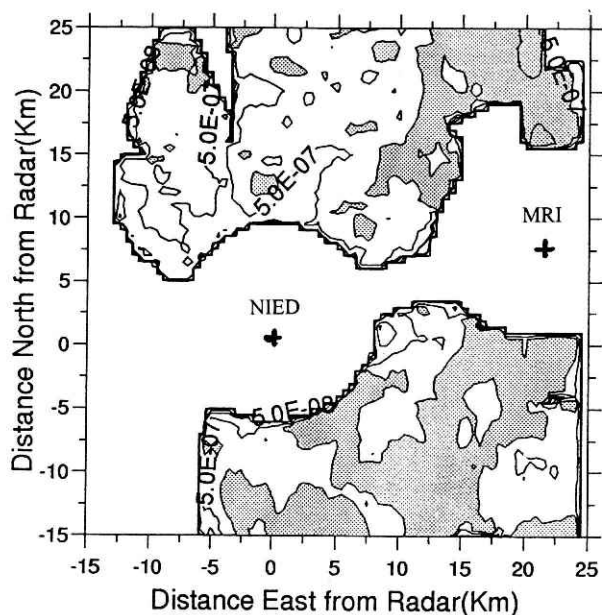


図3 デュアル解析から得られた風速の二次微分の大きさの分布(単位は  $m^{-1}s^{-1}$ )。

Fig. 3 A map of the second derivatives in  $m^{-1}s^{-1}$  derived from dual analysis.

しかし、両図を細かく比較すると、MVVP法の結果は防災科研レーダ南東部のシヤーラインの領域がはっきりと示されず、防災科研レーダ北東部のシヤーラインの風

向変化が激しすぎる、といった相違が見られる。これらの相違はシヤーライン上に顕著に見られることから、風速場の非線形性に原因があると思われる。そこで、デュアル解析の結果から、非線形性の大きさ(ここでは、風速の二次微分項を考える)を計算した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 によれば、今回の事例で非線形性の値は Walteufel and Corbin (1979) が求めた値 (Table 1 参照) よりも大きな値である。これは、彼らが前線のデータを元にしたのに対して、今回のデータがシヤーラインというスケールの小さくより激しい現象を対象にした為と考えられる。非線形性の大きさの水平分布を見ると、デュアル解析と MVVP 法の推定結果に相違の大きかったシヤーライン上での非線形項の大きさは  $10^{-6} (m^{-1}s^{-1})$  程度と、相違の小さかったシヤーライン以外の点での  $10^{-7} (m^{-1}s^{-1})$  より 1 オーダ大きかった。この結果は、風速場の非線形に応じて推定誤差が大きくなるという推論を裏付けるものである。

つぎに、デュアル解析の結果を真値と考え、MVVP法の風速推定について誤差の大きさを考えた。しかし、第2節で述べたように、MVVP法の風速推定はローテーションの効果を含んだ結果になっているので、デュアル解析の結果と比較するために MVVP 法の推定結果からローテーションの効果を除いた真の平均風速 ( $u_0, v_0$ ) を考えなければならない。ここではデュアル解析の結果からローテーションの大きさを計算し、それを(10)式に代入することで真の平均風速 ( $u_0, v_0$ ) を推定した。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= u'_0 - \frac{y_0(v_x - u_y)_{dual}}{2} \\ v_0 &= v'_0 + \frac{x_0(v_x - u_y)_{dual}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

この計算結果から、非線形性の大きさとデュアル解析との相対誤差 (MVVP-デュアル解析) の関係を調べた。Fig. 4 にこの結果を示す。ただし、○はレーダビームの動径方向成分についての相対誤差、●は接線方向成分についての相対誤差を示す。

Fig. 4 によれば、両成分とも風速場の非線形性が小さい場合、相対誤差も小さく、良い推定結果が得られている。しかし、非線形性が大きくなるにつれ相対誤差が大きくなる傾向にあることがわかる。また、両成分の相対誤差の最大値は、動径成分では100%、接線成分では400%になった。つまり、非線形性が大きくなるにつれて、相対誤差は接線成分に顕著に現れてくる傾向を示している。動径、接線各成分における推定誤差の現れ方の違いはVAD法について非線形性と推定誤差の関係を考慮したSmith and Rabin (1989 a) による結果と一致している。

次に、今回の事例について、デュアル解析より得られた発散場の計算結果とMVVP法による発散場の推定結果とをFig. 5(a), (b)に示す。Fig. 5(a)によれば、発散場はシャーライン上で大きな値が集中しており、他の場所よりも1オーダー大きい $10^{-3}(m^{-1}s^{-1})$ 程度であった。しかし、Fig. 5(b)には、デュアル解析で再現されたシ

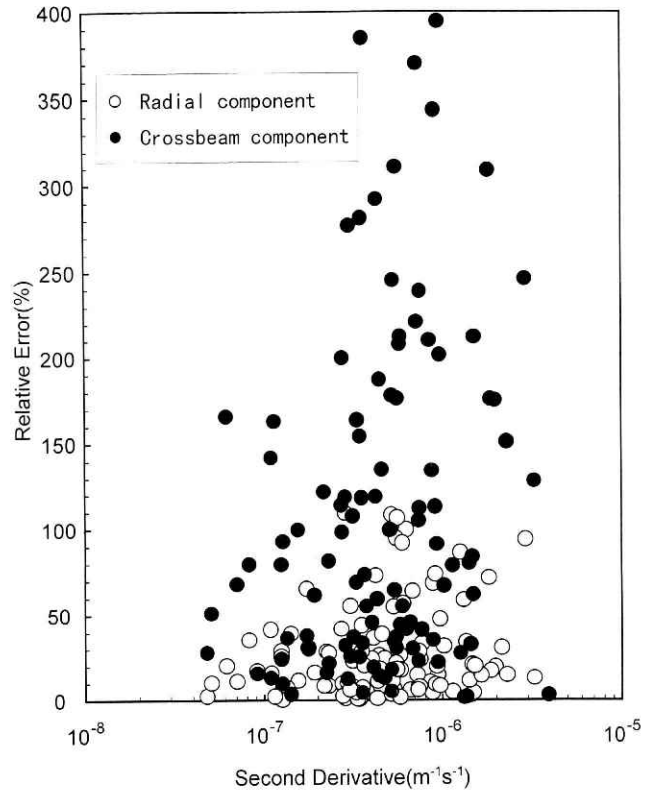


図4 風速の二次微分の大きさと風速の動径成分の相対誤差(○)と接線成分の相対誤差(●)の関係

Fig. 4 Relative errors (%) on the radial (○) and the transverse (●) components of the wind speed, respectively.

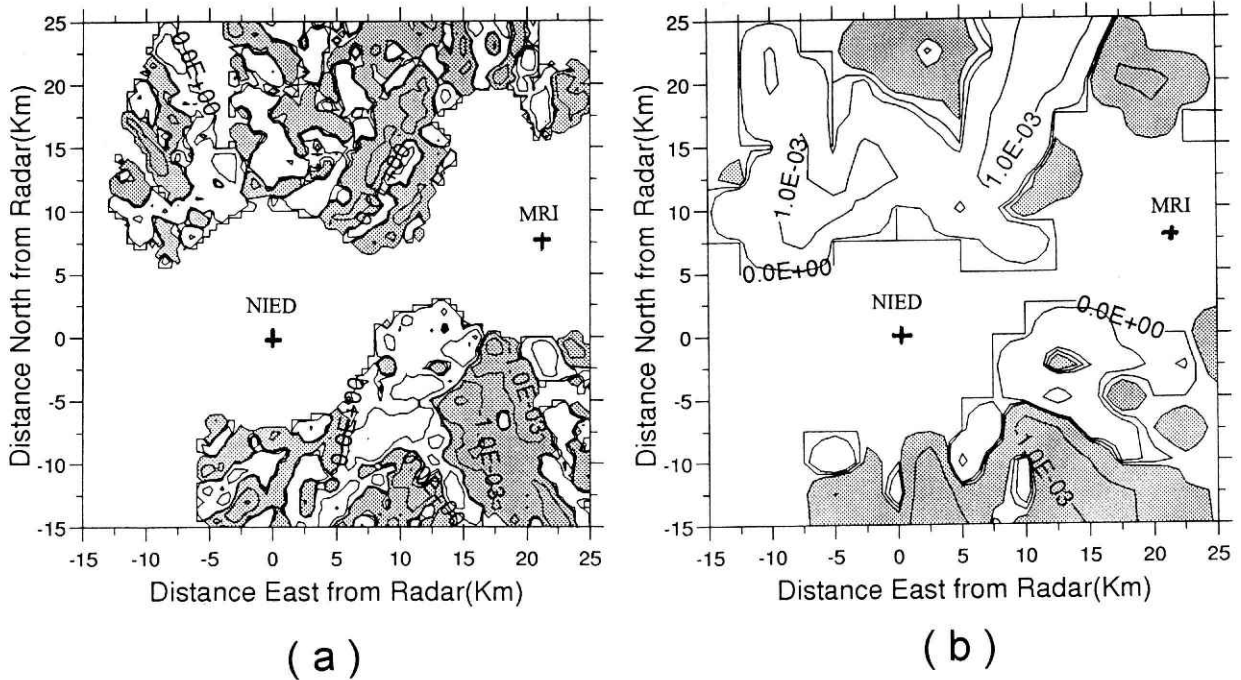


図5 (a)デュアル解析から得られた発散場の分布と(b)MVVP法から得られた発散場の分布。影を付けた領域は、収束している領域を表す。(単位は $s^{-1}$ )

Fig. 5 A map of the divergence field in  $s^{-1}$  retrieved from (a) dual analysis and (b) the MVVP, respectively. Hatched region indicate convective region.

ヤーライン上での大きな発散量を持つ領域が存在しない。また、防災科研レーダの北東方向のシャーライン上で、収束している領域と発散している領域が隣り合っているパターンなどデュアル解析の結果とは大きな相違が見られる。

Koscielny *et al.* (1982) らは前線に MVVP 法を用いて発散場の推定に成功しているが、既に述べたように、本事例における非線形性の大きさは前線で観測されたものより大きなものであった。このことから、MVVP 法による発散場推定においても非線形性の増大にともない、推定誤差が大きくなることが予想される。

#### 4. 数値実験

前章の結論から、MVVP 法の推定誤差が非線形項の大きさに比例する傾向にある事がわかった。そこで、この章では非線形性を持つ風速場に適用できる限界について調べた。しかし、デュアル解析にも推定誤差は含まれているので、本研究では、真の風速場を知ることのできる数値実験により、風速場の非線形性と推定誤差の関係調べた。

数値実験は、数学モデルによって作られたドップラー速度データに、MVVP 法を適用することで行った。数学モデルは、防災科研所有の X バンドドップラーレーダ (波長=3 cm, 最大観測距離=64 km) を想定して作成された。MVVP 法は、レーダの設置点を中心として、南北-40km~40km, 東西-40km~40km の矩形領域に適用した。また、解析領域には、第 3 章の解析と同様の領域を考えた。

##### 4.1 7 パラメータにしたときの推定誤差

第 2 章で述べたように、VVP 法が推定できる風速場のパラメータは 11 個である。しかし、MVVP 法では、この中から  $(w_0, w_x, w_y, w_z)$  の 4 つのパラメータを除いた、7 個のパラメータを推定している。パラメータを除いたことによる推定誤差は、Koscielny *et al.* (1982) で述べられている。彼らによれば、完全なモデルから  $l$  個 ( $l=11-m$ ) のパラメータを除いたことによって最小二乗法は、

$$E[\mathbf{K}_m] = \mathbf{K}_m + \mathbf{A}_m \mathbf{K}_l^T \quad (17)$$

なる推定結果の誤差を伴うことが示されている。ただし、 $E[\mathbf{K}_m]$  は MVVP 法による推定風速パラメータ、 $\mathbf{K}_m$  は真の風速パラメータである。したがって、 $l$  個のパラメータを除外した時の誤差は、 $\mathbf{A}_m \mathbf{K}_l^T$  で表される事になる。ただし、 $\mathbf{K}_l^T = [k_{m+1}, k_{m+2}, \dots, k_{11}]$  は除外されたパラメータ、 $\mathbf{A}_m$  はエーリアスマトリクスと呼ばれ、

$$\mathbf{A}_m = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{P}_{mm}^{-1} [\mathbf{P}_{nm}^T \mathbf{P}_{nl}] \quad (18)$$

で定義される。ただし、 $\mathbf{P}_l = [\mathbf{P}_{m+1}, \mathbf{P}_{m+2}, \dots, \mathbf{P}_{11}]$  である。(17), (18) 式から、 $l$  個のパラメータを除いたために生じる推定誤差は、解析領域の位置 (レーダビームの方向, 仰角, レンジ) に依存する事がわかる。

MVVP 法では、完全な数学モデルから 4 つのパラ

メータを除いている。したがって、これらのパラメータを除いたために生じる誤差の量を考慮しておかなければならない。また、低高度での風速場を推定する場合に、鉛直流の影響が無視できるのかどうかを確かめなければならぬ。

従来、 $l$  個のパラメータを除いたために生じる誤差の大きさは、(17), (18) 式を用いて、ある一つの解析領域に着目した形で行われてきた。しかし、これでは、推定誤差の空間分布を知ることができない。そこで、風速の X 成分, Y 成分と発散場についての推定誤差の水平分布を求めた。この結果をそれぞれ Fig. 6 (a), (b), (c) に示す。このとき、除外されたパラメータ ( $w_0, w_x, w_y, w_z$ ) には、メソスケール現象で典型的に観測される値 (Table 2) を用いた。

これらの結果から、各パラメータにはそれぞれ特有な誤差パターンが存在する事がわかる。これは、先に述べたように、この種の誤差が解析領域の位置に依存するためである。また、誤差の最大値は  $\Delta k_1 = 0.69(\text{ms}^{-1})$ ,  $\Delta k_2 = 0.65(\text{ms}^{-1})$ ,  $\Delta \text{div} = \Delta(k_4 + k_5) = 1.9 \times 10^{-5}(\text{s}^{-1})$  であり、メソスケール現象で代表的な値よりもはるかに小さい値である (Table 1 参照)。この結果から、線形場の仮定が成り立つ場合に MVVP 法は十分な精度の風速場推定を行えることが分かる。

理論上 (17), (18) 式を用いる事で、非線形性を持つ場合の推定誤差の大きさも求められる。ただし、その際に使用される数学モデルは非線形項まで考慮しなければならぬ。しかし、非線形項まで考慮した数学モデルの場合、Smith and Rabin (1989 b) や Boccippio (1995) は、線形項と非線形項の間の強い相関により最小二乗法の堅牢さ (robustness) が失われ、MVVP 法が大きな誤差を発生させることを報告している。すなわち、(17), (18) 式で予想される推定誤差以外に最小二乗法の解の不安定に由来する誤差が、推定誤差に加わることを意味している。したがって、ここでは、非線形項を含む風場の場面に直接 MVVP 法を適用することで、非線形性による MVVP 法の推定誤差を考えた。

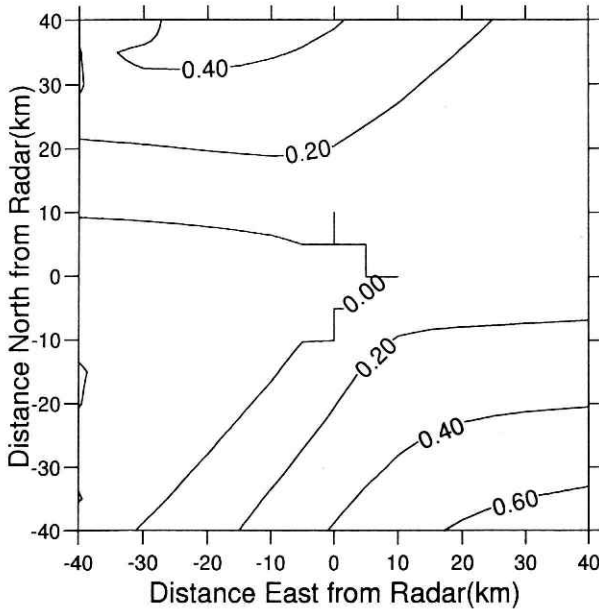
##### 4.2 一様な非線形場での推定誤差

線形性が保たれた風速場に対して、適切な解析領域を設定した MVVP 法は十分精度の良い結果を与えることが分かった。次に、非線形性を持った風速場に MVVP 法を適用した場合の推定誤差について調べた。まず最初に、一様な非線形場がレーダ観測範囲すべてに分布している

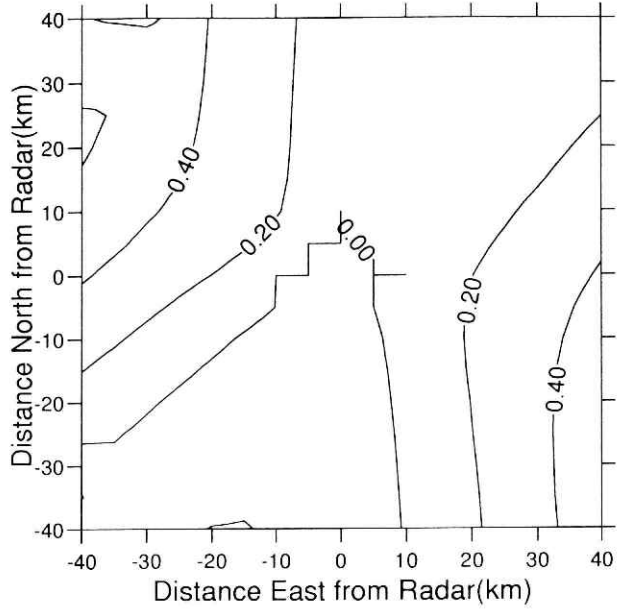
表 2 MVVP 法で計算から除かれたパラメータの大きさ

Table 2 Magnitude of excluded parameter to calculate bias on MVVP.

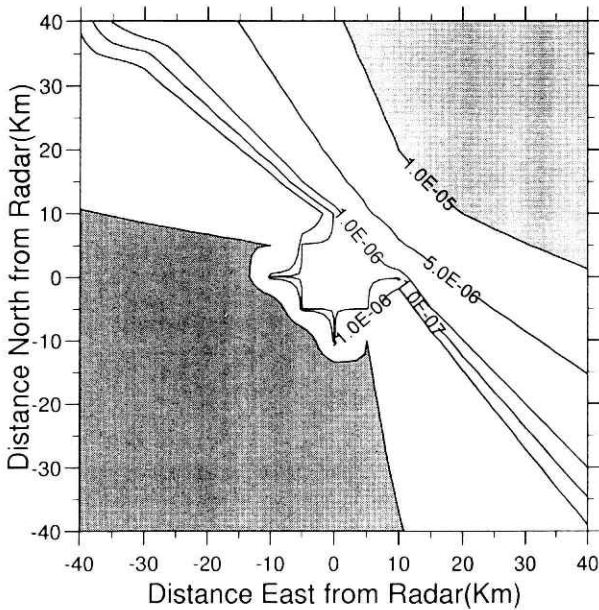
Term	Used parameter
$w_0$	$5.0 \text{ms}^{-1}$
$w_z$	$2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$
$w_x, w_y$	$5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$



(a)



(b)



(c)

図6 ( $w_0, w_x, w_y, w_z$ )のパラメータを除くことにより発生する推定誤差の分布. (a), (b), (c), はそれぞれ  $u'_0(k_1), v'_0(k_2)$  (単位は  $\text{ms}^{-1}$ ) そして  $\text{div}(k_4+k_5)$  (単位は  $\text{s}^{-1}$ ) の各成分についての推定誤差を示す.

Fig. 6 Maps of the estimated errors caused by the excluded parameters ( $w'_0, w_x, w_y, w_z$ ). The figures of (a), (b), (c) show the maps of estimated errors on  $u'_0(k_1), v'_0(k_2)$  in  $\text{ms}^{-1}$ , and  $\text{div}(k_4+k_5)$  in  $\text{s}^{-1}$ , respectively.

ときの推定誤差の性質を考えた.

この時の非線形項 (二次微分) を含んだ風速場は, Waldteufel and Corbin (1979) のモデルにしたがって計算した. すなわち,

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 + u'_x x + u'_y y + u'_z z + u''_{xx} x^2 + u''_{xz} xz + u''_{zz} z^2 \\ v &= v_0 + v'_x x + v'_y y + v'_z z \\ w &= w_0 + w'_z z + w''_{xx} x^2 + w''_{xz} xz + w''_{zz} z^2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

である. 線形項の係数 ( $u_0, u'_x, u'_y, u'_z, v_0, v'_x, v'_y, v'_z, w_0, w'_z$ ) にはメソスケール現象で観測された代表的な値と同程度の大きさの数値を代入した (Table 1). また, 非線形

項の係数 ( $u''_{xx}, u''_{xz}, u''_{zz}, w''_{xx}, w''_{xz}, w''_{zz}$ ) には任意の値を代入した. 数値実験では, (19) 式の結果をドップラー速度に変換したデータに MVVP 法を適用した推定結果と真の風速場との比較を行った.

線形場として発散場  $\text{div} = 10^{-3} (\text{s}^{-1})$  を選び,  $10^{-9} (\text{m}^{-1} \text{s}^{-1})$  オーダの非線形項を加えた風速場の推定結果を調べた結果を示す. Fig. 7(a), (b) はそれぞれ真の風速場, MVVP 法による推定結果である. ただし, この風速場では MVVP 法により推定された水平風速 ( $u'_0, v'_0$ ) はローテーションによるバイアスがないため, 真の水平風速 ( $u_0, v_0$ ) に等しいことを注意しておく. この図から, この程度の非線形性では, MVVP 法は十分良い風速場の推定することがわかる. 次に, Fig. 8(a), (b) は, 発散場についての真値と MVVP 法の推定結果である. MVVP 法の推定結果には推定誤差が存在しているが, その絶対値は  $10^{-5} (\text{m}^{-1} \text{s}^{-1})$  のオーダでメソスケールの気象現象で見られる気象現象の発散量よりはるかに小さい誤差である. つまり, 非線形効果の小さい穏やかな大気現象に対して, MVVP 法が十分良い推定を行えることを示している.

つぎに, 非線形項を  $10^{-6} (\text{m}^{-1} \text{s}^{-1})$  のオーダまで大きく



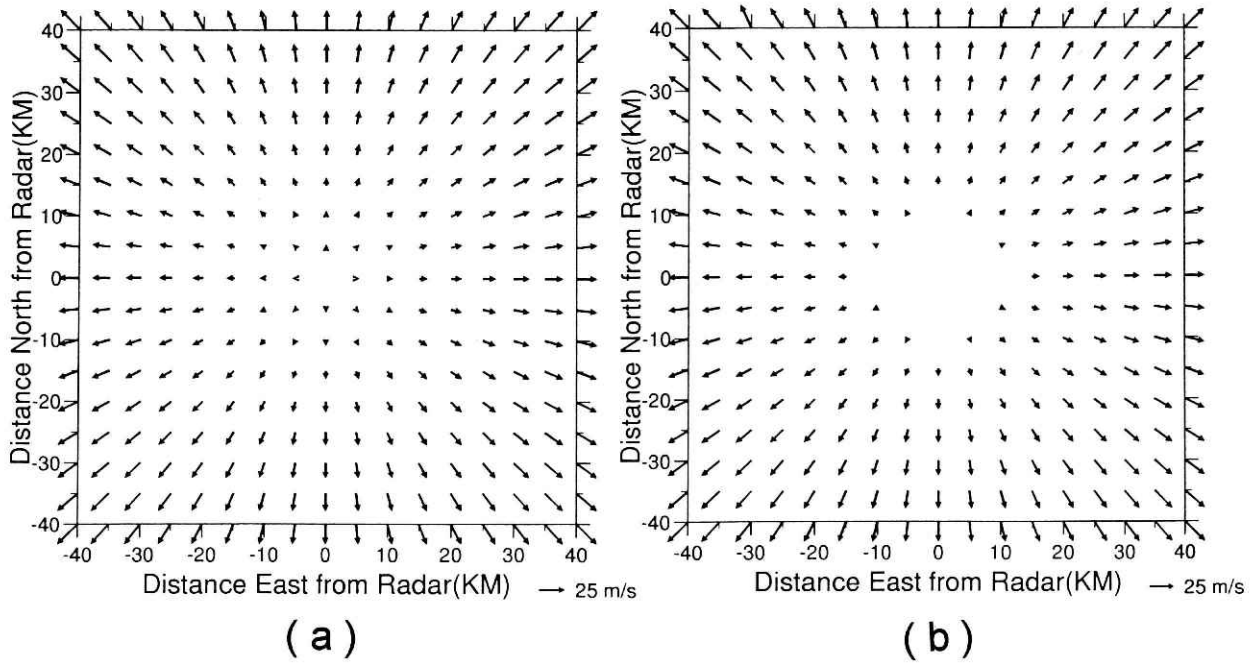


図7 (a)シミュレーション用に作成した風速場と、(b)MVVP 法から得られた推定風速場。二次微分の大きさが $10^{-9}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$ のオーダーの場合。

Fig. 7 (a) The wind field from the simulated data and (b) the wind field retrieved from the MVVP. These results are obtained for the case that the second derivative is  $10^{-9}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  order.

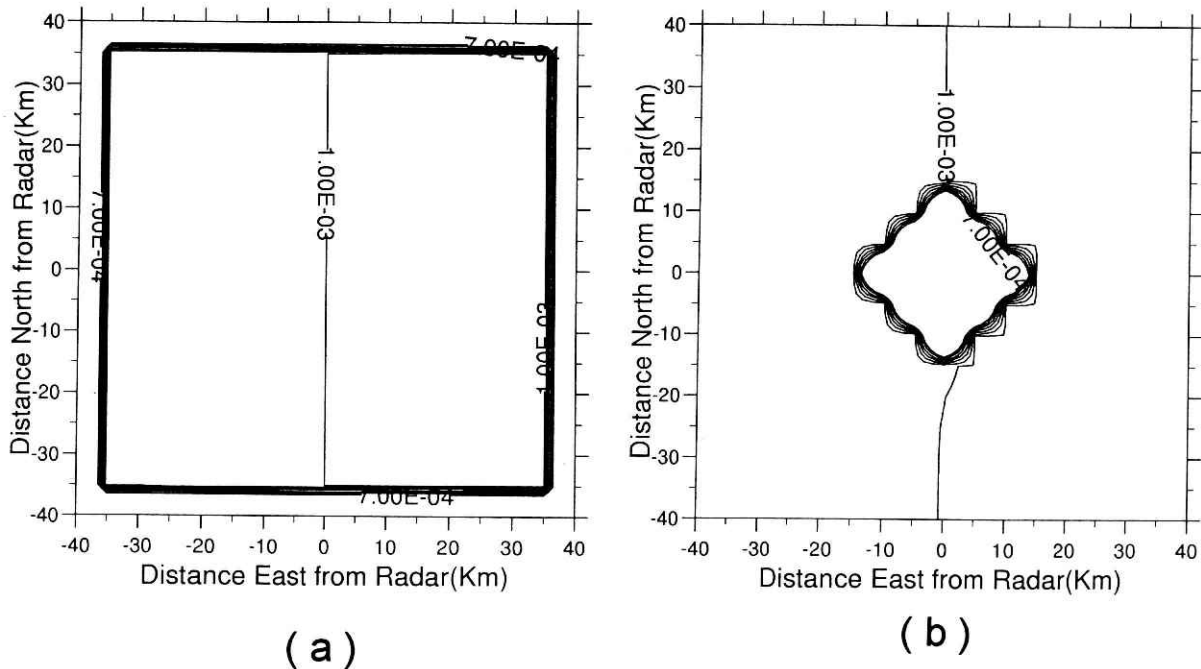


図8 (a)シミュレーション用に作成した風速場から得られた発散場の分布と、(b)MVVP 法から得られた推定発散場。単位は  $\text{s}^{-1}$ 。二次微分の大きさが $10^{-9}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$ のオーダーの場合。

Fig. 8 (a) the divergence field in  $\text{s}^{-1}$  from the simulated data and (b) the divergence field in  $\text{s}^{-1}$  retrieved from the MVVP. These results are obtained for the case that the second derivative is  $10^{-9}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  order.

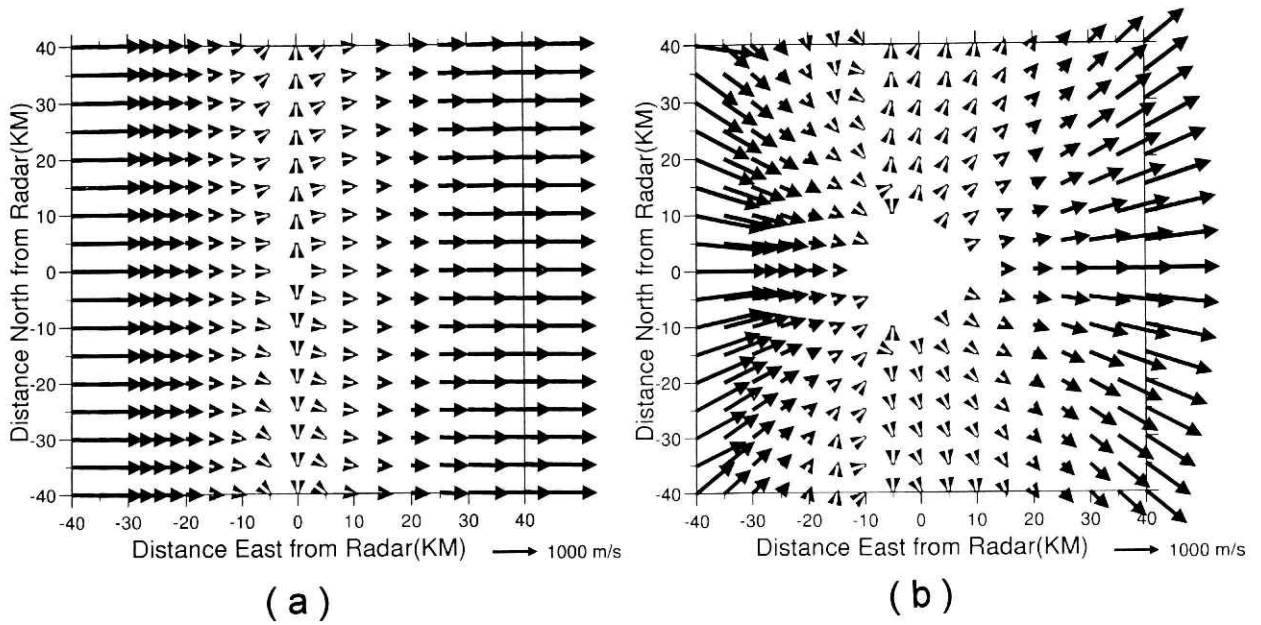


図 9 (a)シミュレーション用に作成した風速場と、(b)MVVP 法から得られた推定風速場。二次微分の大きさが $10^{-6}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$ のオーダーの場合。

Fig. 9 (a) the wind field from the simulated data and (b) the wind field retrieved from the MVVP. These results are obtained for the case that the second derivative is  $10^{-6}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  order.

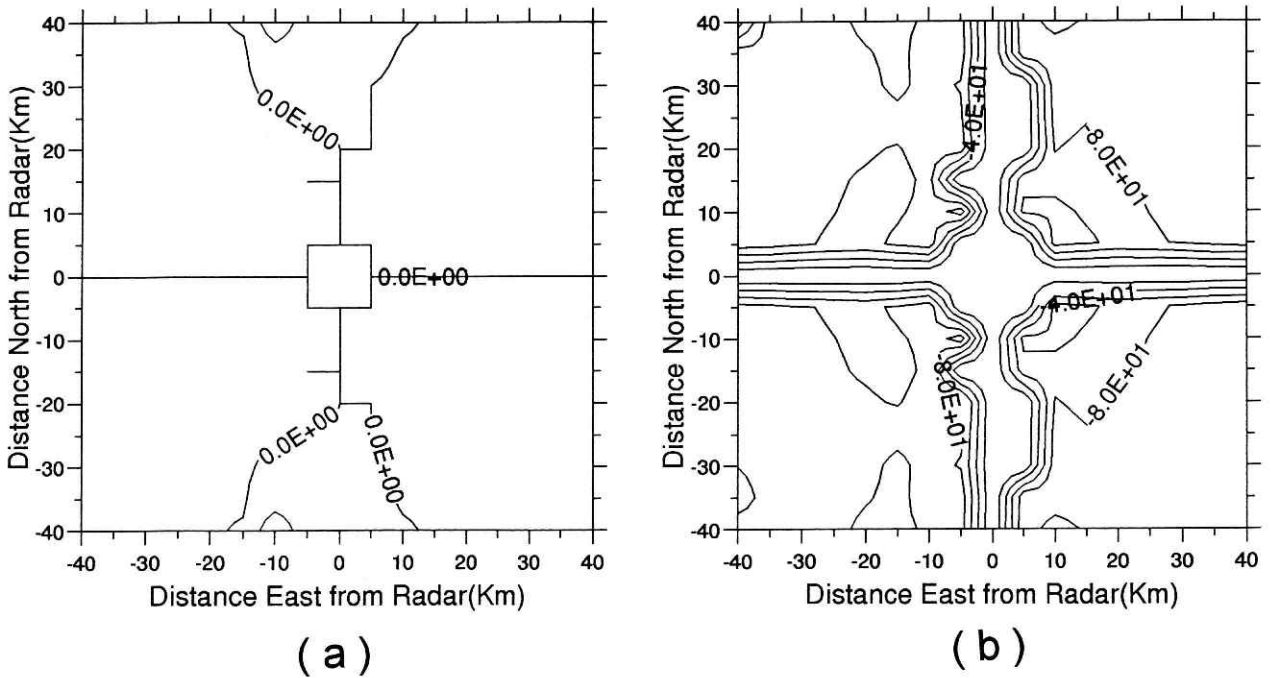


図10 (a)風速場の動径成分についての相対誤差(%)と、(b)接線成分についての相対誤差(%)の分布。二次微分の大きさが $10^{-6}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$ のオーダーの場合。

Fig. 10 Maps of the relative errors (%) on (a) the radial components and (b) the transverse components of the wind speed, respectively.

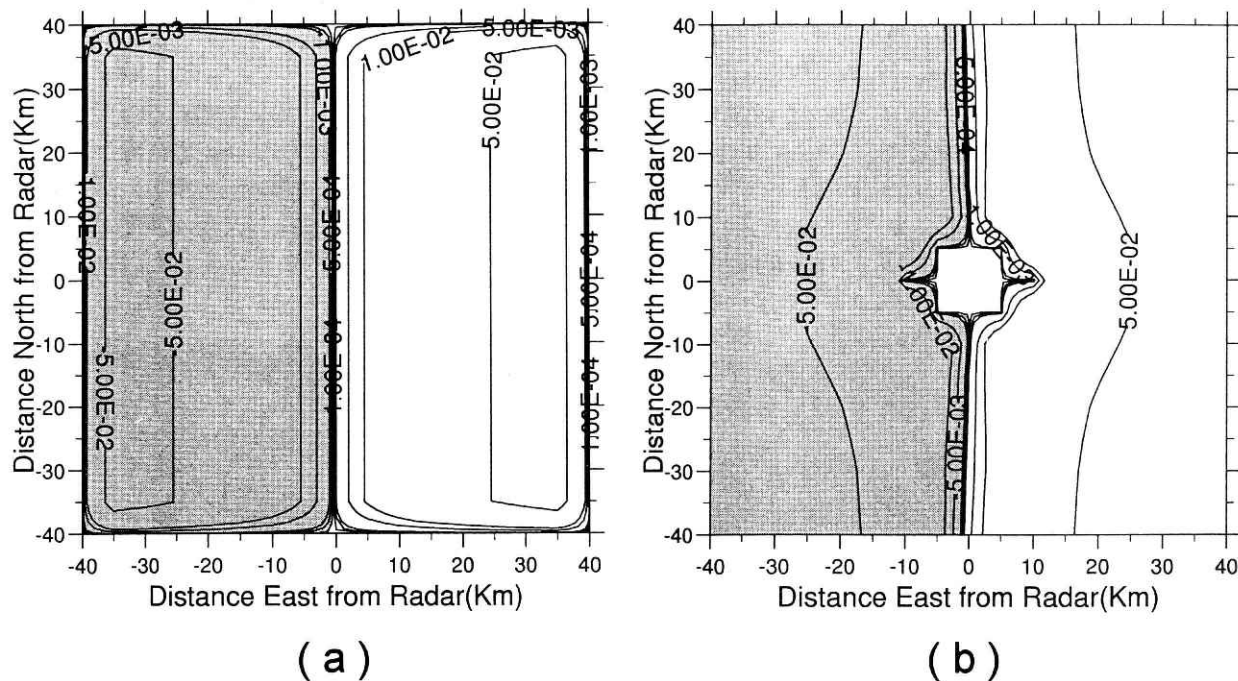


図11 (a)シミュレーション用に作成した風速場から得られた発散場の分布と、(b)MVVP 法から得られた推定発散場。単位は  $s^{-1}$ 。二次微分の大きさが  $10^{-6} (m^{-1}s^{-1})$  のオーダーの場合。

Fig. 11 (a) the divergence field in  $s^{-1}$  from the simulated data and (b) the divergence field in  $s^{-1}$  from the MVVP. These results are obtained for the case that the second derivative is  $10^{-6} (m^{-1}s^{-1})$  order.

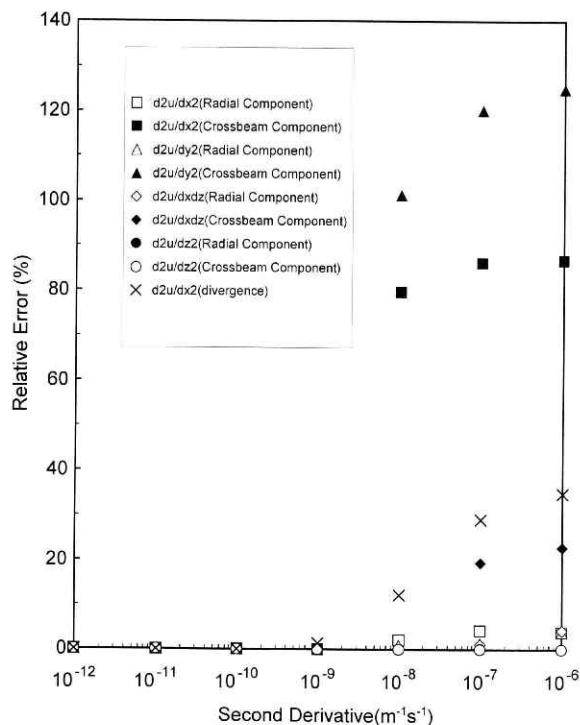


図12 二次微分の大きさと相対誤差の関係。縦軸は、矩形領域内の全グリッドの相対誤差の絶対値についての平均値である。

Fig. 12 The relationships between second derivatives and relative errors. The relative errors are averaged values at each grid.

した場合を考えた。この時の真の風速と MVVP 法の風速推定結果を Fig. 9(a), (b)にそれぞれ示す。この図から、この程度の非線形性になると MVVP 法の風速推定に大きな誤差が生じてくるのがわかる。このときの風速の誤差パターンを詳しく見るために、風速の動径成分、接線成分の相対誤差パターンを求めた。この結果を Fig. 10(a), (b)にそれぞれ示す。この図から、第3章の観測結果と同様に、推定結果は動径成分の相対誤差(%)は小さいが、接線方向では大きな相対誤差(%)を持っていることがわかる。また、相対誤差は、レーダービームの方向と距離に強く依存していることがわかる。これは、解析領域の位置で決まるバイアスが推定誤差に強く影響していることを示している。

つぎにこの数値実験で得られた真の発散場と MVVP 法の発散場推定結果を Fig. 11(a), (b)にそれぞれ示す。このときの発散場についての推定誤差の大きさは、最大  $10^{-2}(s^{-1})$  程度のオーダーで、メソスケール現象で観測される値よりも大きくなっている。すなわち、非線形項が大きくなった場合、風速場、発散場共に MVVP 法が真の風速場を再現できないことを示している。

最後に、非線形場を大きくしていった場合の推定誤差の応答を考えた。Fig. 12 は、線形場として Fig. 7 と同じ  $\text{div}=10^{-3}(s^{-1})$  をとり  $\partial^2 u/\partial x^2$ ,  $\partial^2 u/\partial y^2$ ,  $\partial^2 u/\partial^2 x \partial z$ ,  $\partial^2 u/\partial z^2$  の4種類の非線形場を加えたときに得られた風速の動径、接線の各成分と、 $\partial u/\partial x^2$  を加えたときの発散場について相対誤差を、MVVP 法を適用した矩形領域内の全

グリッド点について平均した値をプロットしたものである。

この図から、各成分、発散場に共通して、非線形項が小さい場合には推定誤差が見られず、十分な精度の風速場の推定を行っていることがわかる。しかし、非線形項を  $10^{-9}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  のオーダーまで大きくすると推定誤差が発生しはじめる事がわかる。さらに、 $10^{-8}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  のオーダーまで大きくすると、風速の動径成分では相対誤差が小さいが、接線成分に顕著に現れることがわかる。また、発散場についても、10%程度の相対誤差を含む精度の悪い推定結果しか得られなくなっており、この程度の非線形性を伴う現象に MVVP 法を適用すると、大きな推定誤差を伴うことがわかる。

また、この図から、 $\partial^2 u/\partial x^2, \partial^2 u/\partial y^2$  の様な、水平方向の二次微分が加わった場合に風速の推定誤差が大きく現われ、 $\partial^2 u/\partial x\partial z, \partial^2 u/\partial z^2$  の様な鉛直方向の微分を加えた場合には推定誤差が小さいという傾向が示された。この傾向は、MVVP 法の推定誤差が水平方向の非線形性には影響されやすく、鉛直方向の非線形性には影響されずらいことを示している。

以上、空間的に一様に非線形性を加えた風速場に対する数値実験の結果をまとめると、MVVP 法は、鉛直方向への非線形性が加わっても精度の良い推定を行うことができ、水平方向の非線形性では、 $10^{-8}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  オーダー程度の非線形性を持った現象（前線などの大きなスケールの

現象）までなら十分な精度の推定結果を得ることができると結論づけられる。

### 4.3 シャーライン

前節で、空間的に広く一様な非線形性をもつ風速場に MVVP 法を適用した際の推定誤差の特徴を見てきた。しかし、3章で述べた様に局所的に集中している大気現象も考えられる。この節では、このような現象をシミュレーションで再現して、MVVP 法の推定誤差の特性を考える。

#### 4.3.1 データ作成方法

(19)式のモデルを元に、非線形性が局在する風速場を再現するモデルを考えた。ここでは、第3章のシャーラインの様な、ライン状に非線形性が局在する現象を想定した。

まず、X 軸上の距離  $r$  の地点に Y 軸に平行に幅  $2l$  の非線形場を局在させる領域 II, III を設定する (Fig. 13 参照)。これによって、2つの非線形場の領域 (領域 II, III) と2つの線形場の領域 (領域 I, IV) ができる。つぎに、2つの非線形場、2つの線形場の領域それぞれについてドップラー速度データを計算する。ここでは、簡単化のため、線形場の領域では一様風が吹くものとした。また、非線形項についても、前節の結果を踏まえ、 $\partial^2 u/\partial x^2, \partial^2 v/\partial x^2$  の様な X 方向についての水平微分の効果しか考えないことにした。風速のモデルは、各領域について、

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} u &= -u_0 \\ v &= -v_0 \\ w &= w_0 \end{aligned} \right\} \text{(領域 I)} \\
 & \left. \begin{aligned} u &= -u_0 + u_{xx}(x - (r - l))^2 \\ v &= v_0 + v_{xx}(x - (r + z))^2 \\ w &= w_0 \end{aligned} \right\} \text{(領域 II)} \\
 & \left. \begin{aligned} u &= u_0 - u_{xx}(x - (r + l))^2 \\ v &= v_0 - v_{xx}(x - (r + l))^2 \\ w &= w_0 \end{aligned} \right\} \text{(領域 III)} \\
 & \left. \begin{aligned} u &= u_0 \\ v &= v_0 \\ w &= w_0 \end{aligned} \right\} \text{(領域 IV)}
 \end{aligned} \tag{20}$$

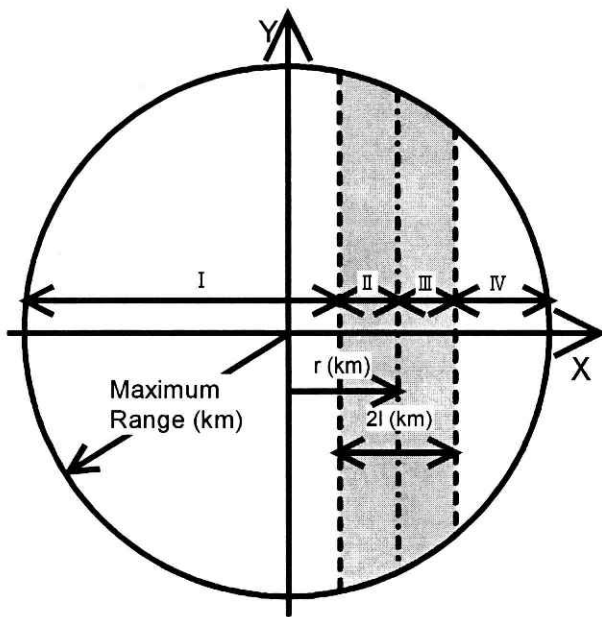


図13 非線形性が局在した場合を想定したシミュレーションの概念図。距離  $r$  (km) の影を付けた領域に、非線形性を与える。

Fig. 13 Schematic figure of the simulations that the second derivative is localized in a small region. Hatched area that is located at distance  $r$  (km) is added the second derivative.

を用いて風速場を設定した。このとき、任意のパラメータ ( $u_0, v_0, w_0, u_x, v_x, u_{xx}, v_{yy}$ ) には、各領域で風速が連続するように設定した。

#### 4.3.2 結果

前節で定義したモデルにより、シャーラインのように非線形性が局在する風速場に対する MVVP 法の推定誤差の特性を調べた。

数値実験は、線形場の領域に Y 軸方向への一様風を吹かせ、原点から距離 10 km に幅 10 km の領域に非線形項  $\partial^2 v/\partial x^2$  を加えた。非線形項の大きさは任意に変化させた。この風速場では、発散場は矩形領域に対して一様に、 $\text{div}=0(\text{s}^{-1})$ 、である。

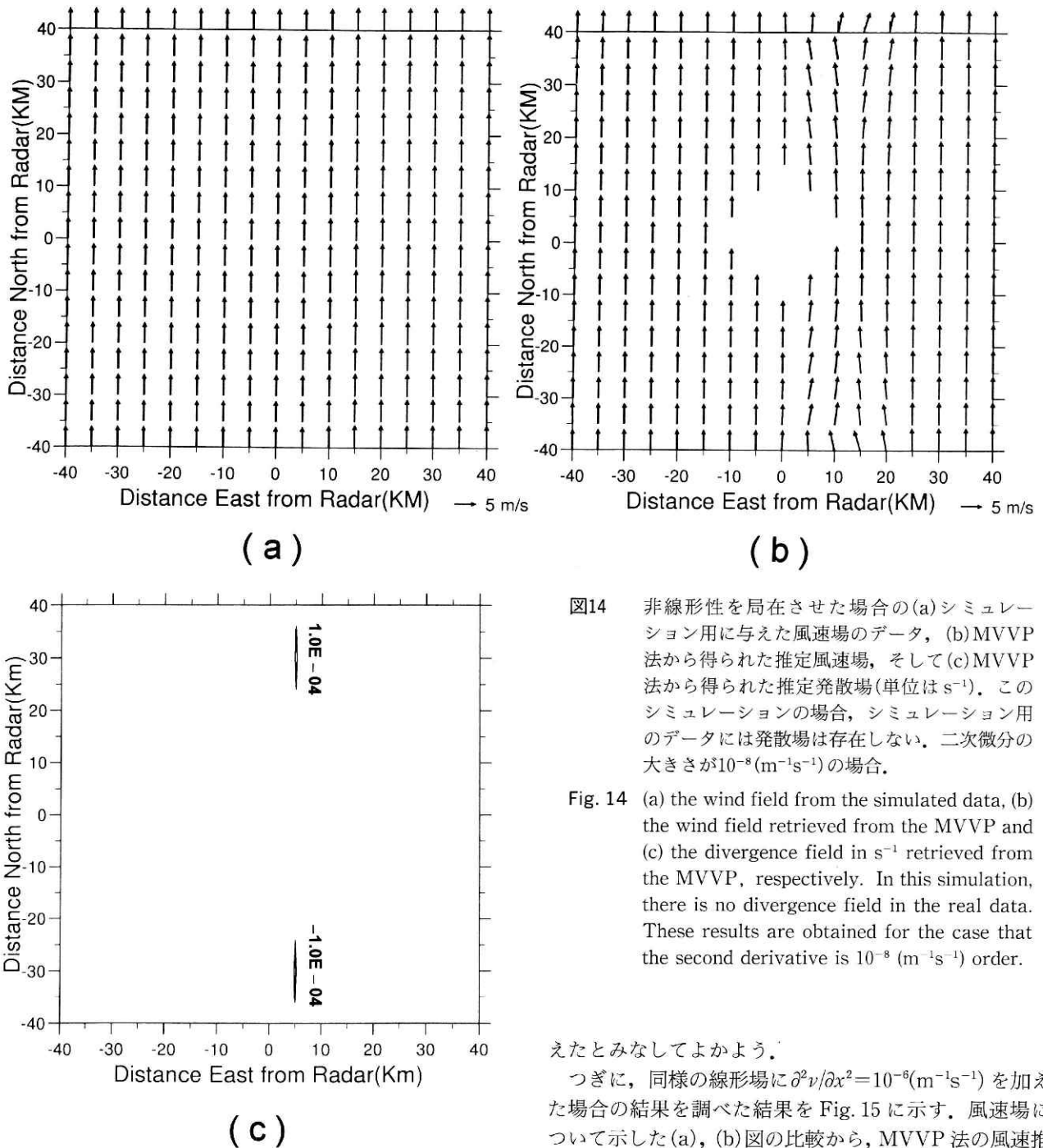


図14 非線形性を局在させた場合の(a)シミュレーション用に与えた風速場のデータ, (b)MVVP法から得られた推定風速場, そして(c)MVVP法から得られた推定発散場(単位は $s^{-1}$ ). このシミュレーションの場合, シミュレーション用のデータには発散場は存在しない. 二次微分の大きさが $10^{-8}(m^{-1}s^{-1})$ の場合.

Fig. 14 (a) the wind field from the simulated data, (b) the wind field retrieved from the MVVP and (c) the divergence field in  $s^{-1}$  retrieved from the MVVP, respectively. In this simulation, there is no divergence field in the real data. These results are obtained for the case that the second derivative is  $10^{-8}(m^{-1}s^{-1})$  order.

えたとみなしてよかよう.

つぎに, 同様の線形場に $\partial^2 v / \partial x^2 = 10^{-6}(m^{-1}s^{-1})$ を加えた場合の結果を調べた結果を Fig. 15 に示す. 風速場について示した(a), (b)図の比較から, MVVP法の風速推定は線形場の領域については良い結果を得ているが, 非線形場の領域とその周辺の領域で大きな誤差を持ってしまったことがわかる. この時の推定風速の誤差も, 前節の数値実験と同様, 動径成分では小さいが接線成分で大きくなる傾向を示した. 非線形場周辺の線形場の領域でも推定誤差が発生した原因は, 解析領域の一部が非線形場の中に設定されたためと考えられる. これは, 同じX座標でも解析領域の体積が小さく体積の小さいY座標値が小さい場所では推定誤差が小さいことからわかる. つまり, 非線形性が局所的に存在する大気現象では, MVVP法は非線形性の存在する領域以外でも大きな推定誤差を発生させる可能性が存在する. また, 非線形場の中心で非線形項の正負を逆にしたことにともない, 推

Fig. 14(a), (b), (c)は, それぞれ,  $\partial^2 v / \partial x^2 = 10^{-8}(m^{-1}s^{-1})$ の時の真の風速, MVVP法による推定風速, MVVP法の推定発散場である. ただし, (b)図は, 推定結果からローテーションの効果を除いてある. (a), (b)両図を比較すると, 風速推定は線形場の領域については非常に良い推定を行っている事がわかる. また, 非線形場の領域についても $y = \pm 40km$ に近づくにつれ若干の推定誤差が発生しているが, 概ね良い風速推定結果を得ている事が分かる. 発散場の推定結果を示した(c)図は, 発散場( $10^{-4}s^{-1}$ 程度のオーダー)が生じている事を示している. しかし, 発散場を示した領域がごく狭い領域であるので, MVVP法による発散場推定は良い結果を与

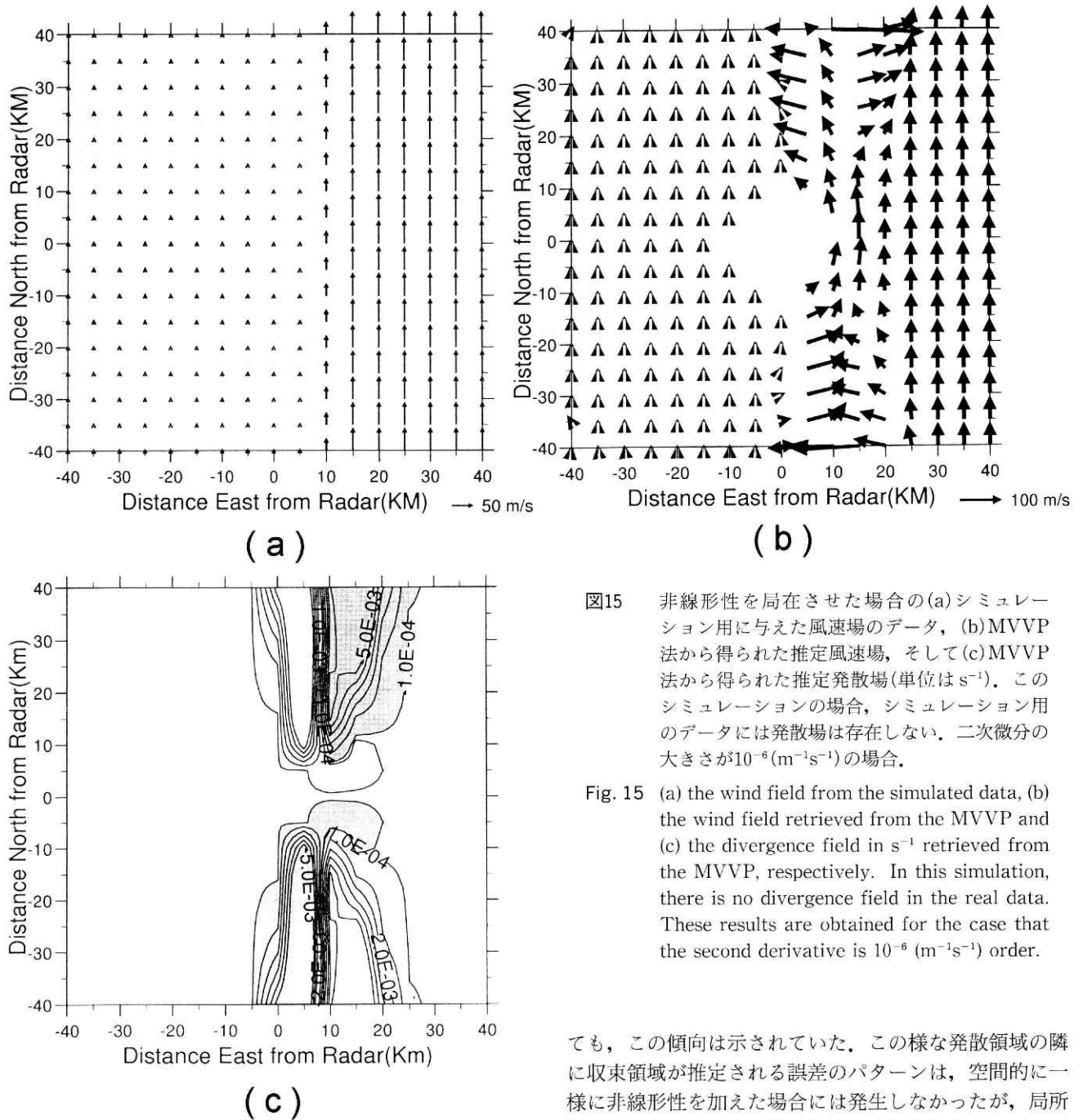


図15 非線形性を局在させた場合の(a)シミュレーション用に与えた風速場のデータ, (b)MVVP法から得られた推定風速場, そして(c)MVVP法から得られた推定発散場(単位は $s^{-1}$ ). このシミュレーションの場合, シミュレーション用のデータには発散場は存在しない. 二次微分の大きさが $10^{-6} (m^{-1}s^{-1})$ の場合.

Fig. 15 (a) the wind field from the simulated data, (b) the wind field retrieved from the MVVP and (c) the divergence field in  $s^{-1}$  retrieved from the MVVP, respectively. In this simulation, there is no divergence field in the real data. These results are obtained for the case that the second derivative is  $10^{-6} (m^{-1}s^{-1})$  order.

定風速は非線形場の中心で点対称な誤差パターンを示している。

この様な推定風速の誤差にともない, 推定発散場においても MVVP 法は非線形場の領域周辺に広く収束場と発散場を再現している (Fig. 15(c) 図参照). 推定誤差の大きさは,  $10^{-3}(s^{-1})$  程度の大きさである. つまり, この程度の非線形性になると, 局所的に非線形性を持つ風速場に対し MVVP 法が高精度の推定を与えることができる適用限界を越えたことを示す.

発散場の推定誤差でもう一つ指摘したいことは, 非線形場の中心点を挟んで収束場と発散場が並んで分布することである. 異なる位置に非線形性を加える領域を置い

ても, この傾向は示されていた. この様な発散領域の隣に収束領域が推定される誤差のパターンは, 空間的に一様に非線形性を加えた場合には発生しなかったが, 局所的に非線形性を加えた場合には必ず発生した. このため, この誤差パターンは局在した非線形性を持つ風速場に MVVP 法を適用した場合に発生する傾向だと考えられる.

つぎに, MVVP 法の適用限界について考えてみた. 前節では, 広く一様な非線形場を考えたときに,  $10^{-8}(m^{-1}s^{-1})$  オーダ程度の大きさになると推定誤差が顕著に現れることを示した. しかし,  $10^{-8}(m^{-1}s^{-1})$  オーダ程度の大きさの非線形性が局在する場合, MVVP 法は, 風速, 発散場共に比較的良好な推定結果を得ることが示された (Fig. 14). この結果は, 現象が小さなスケールの場合, MVVP 法の適用限界が少し緩くなることを示唆している. そこで, 前節と同じく非線形項の大きさを変えて, 推定誤差との応答関係を調べた. Fig. 16 は, Fig. 14 と同

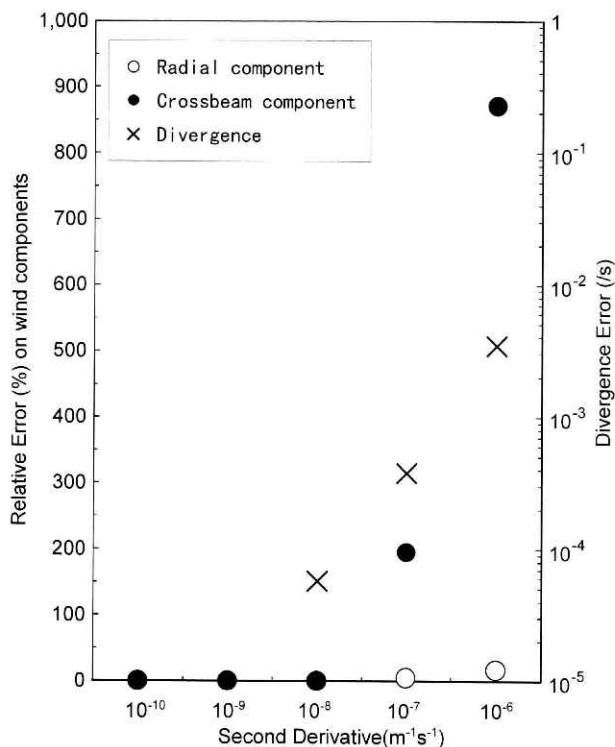


図16 非線形性を局在させた場合の、二次微分の大きさと MVVP 法の推定誤差の関係。縦軸は、矩形領域内の全グリッドの相対誤差の絶対値についての平均である。

Fig. 16 The relationships between second derivative and relative error when second derivative is localized in a small area. The relative errors are averaged values at each grid.

様の線形場、非線形場の領域に非線形項を  $\partial^2 v / \partial x^2$  加えた時の風速の動径成分、接線成分そして発散量の誤差をプロットしたものである。

この結果によれば、非線形項が  $10^{-7}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  程度のオーダーになると風速の接線成分の推定誤差が急激に大きくなるという傾向を示した。また、非線形性が  $10^{-7}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  程度のオーダーの時、発散場の相対誤差は  $10^{-3}(\text{s}^{-1})$  程度で、激しいメソスケール現象で観測される発散量と同程度のオーダーとなっている。このことから、今回の数値実験における MVVP 法が高精度の推定結果を与える非線形性の敷居値は  $10^{-7}(\text{s}^{-1})$  程度の大きさと結論づけられる。空間的に一様に非線形性を与えた場合の敷居値と局在させた場合で敷居値が異なるという結果は、MVVP 法の敷居値が観測する大気現象のスケールによって異なってくることを意味している。

### 5. まとめ

非線形性を持つ風速場に MVVP 法を適用した際に生じる推定誤差の特徴を、観測データ、数値実験によって調べた。また、数値実験では空間的に一様に非線形を加えるモデルと、非線形性を局在させるモデルを用いて、

推定誤差の特徴と MVVP 法が適用できる風速場の非線形性の限界について調べた。

その結果、風速場の持つ非線形性がある敷居値を越えるまで、MVVP 法は風速、発散場ともに高精度の推定を行えることがわかった。しかし、その敷居値を越えると、風速推定の動径成分では比較的小さな誤差しか発生しないが、接線成分に顕著な誤差を発生させることがわかった。発散場についても同様に非線形性の増大にともない推定誤差が増大した。また、MVVP 法の推定誤差は、水平方向の非線形性には敏感だが鉛直方向の非線形性には鈍感であることがわかった。敷居値については、空間的に一様な非線形性を与えたモデルの場合に  $10^{-8}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  のオーダー、局在させたモデルの場合に  $10^{-7}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$  のオーダーという結果を得た。これは、MVVP 法を現実の大気現象に適用する際に、そのスケールによって敷居値が異なってくることを意味している。

また、誤差の分布については空間に一様な非線形場を加えた場合、レーダからの距離と方向に依存することがわかった。また、非線形性を局在させた場合、MVVP 法は発散場の推定で、発散域と収束域が隣り合って推定されるような特徴的な誤差パターンを示した。これは、観測データに MVVP 法を適用した結果にも示されており、非線形性が局在した時の推定誤差の特徴であると考えられる。

本研究では非線形性の大きさと MVVP 法の推定誤差の関係を論じてきた。しかし、どの大気現象までなら適用可能かといった問題までは議論していない。これまで、大気現象の持つ非線形性の大きさを議論した研究は、Waldteufel and Corvin (1979) が前線のデータについて示したのみである。他の大気現象がどの程度の非線形性を持つかはわかっていないのが現状である。今後、これまでのデュアル解析などの結果から様々な大気現象のスケールと非線形性の大きさを調べ、MVVP 法の適用限界と大気現象との関係を明らかにする必要がある。

### 参考文献

- 1) Boccippio, D.J. (1995): A diagnostic analysis of the VVP Single-Doppler retrieval technique, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 230-248.
- 2) Koscielney, A.J., R.J. Doviak and R. Rabin (1982): Statistical consideration in the estimation of divergence from Single-Doppler radar and application to prestorm boundary-layer observation, *J. Appl. Meteor.*, **21**, 197-210.
- 3) Matejika, T. and R.C. Srivastava (1991): An improved version of the extended velocity-azimuth display analysis of Single-Doppler radar data, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **8**, 453-466.
- 4) Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery (1992): *Numerical recipes in C*, Cambridge University Press.
- 5) Smith, S.D. and R.M. Rabin (1989a): Considerations in

- estimating horizontal wind gradients from an individual Doppler radar or a network of wind profiles, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **6**, 446-458.
- 6) Smith, S.D. and R.M. Rabin (1989b): Estimation of divergence in the prestorm boundary layer, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **6**, 459-475.
- 7) 高野 功, 高山 大, 瀬古 弘, 立平良三 (1997): 簡略化 VVP 法による下層風の高分解能モデルへのデータ同化—1994年2月12日の南岸低気圧の事例—, 1997年日本気象学会春季大会大会予稿集, 287.
- 8) Waldteufel, P. and H. Corbin (1979): On the analysis of Single-Doppler radar data, *J. Appl. Meteor.*, **18**, 532-542.
- (原稿受注: 1997年12月3日)

### 要 旨

VVP法 (Volume Velocity Processing) や MVVP法 (Modified VVP) は, 一台のドップラーレーダのデータから風速場の三次元構造を推定する解析法の一つである。この解析法は, ある解析領域内の風速場が線形であることを仮定している。しかし, 実際の風速場は非線形性や不連続性を持っている。これらの特性は, VVP法やMVVP法を実際の大気現象に適用する際の誤差の原因となる。これまで, MVVP法が, どの程度の非線形性を持つ風速場に対して, 高精度の推定を行えるかは明らかになっていない。

本研究では, 観測データと数値実験を用いて作成した風速場にMVVP法を適用して, 風速場の持つ非線形性とMVVP法の推定誤差との関係を調べた。その結果, MVVP法は, 風速場の持つ非線形性が $10^{-7}(\text{m}^{-1}\text{s}^{-1})$ のオーダーを超えるまで, 高精度の推定を行えることが分かった。

キーワード: ドップラーレーダー, MVVP, 解析手法