

単一ドップラーレーダーによる風の鉛直シアの推定精度

立平良三*1・村田行泰*2・瀬古弘*3

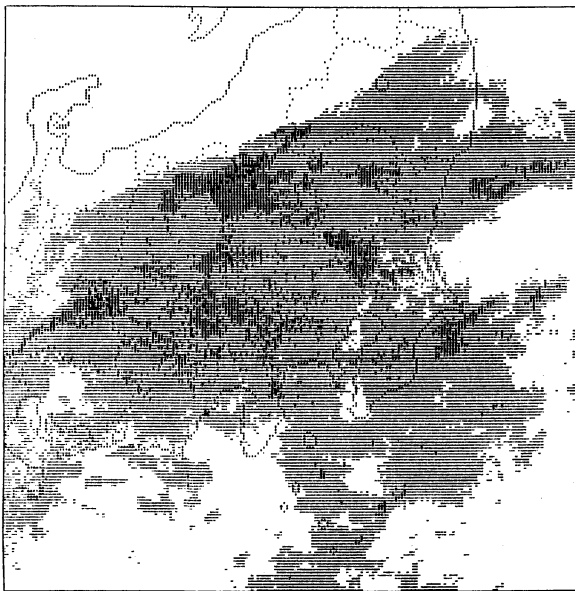
1. まえがき

風の鉛直シアは、温度風やリチャードソン数に関係し、また積乱雲が長続きするための条件にも挙げられるなど、気象学的に重要な物理量である。さらに航空機の離着陸時の安全を確保するためにも、時間的空間的に細かい分解能で測定することが望まれている。この報告では、1台のドップラーレーダーの動径速度データからVVP (Volume Velocity Processing) によって鉛直シアを推定する手法を秋雨前線に伴う降水

域(第1図)に適用し、その精度を考察する。またこの鉛直シアを利用し、VVPによる上層風推定の精度を改善する手法を提案する。

2. VVPによる鉛直シアの推定

VVPでは、レーダーの探知範囲内に解析Volumeを設定し、Volume内の風場を線形と仮定する。このように仮定すれば、Volume中心における風(u_0, v_0, w_0)と風の空間微分(u_x, u_y, u_z など、添字 x, y, z は



関東地方 合成図
 東京 富士 名古屋 新潟
 1993/09/22 15:00
 MODE 3

強度 (mm/h)
 ≡ < 4
 ≡ 4~16
 ■ 16 ≤

第1図 秋雨前線に伴うエコー分布 (1993年9月22日15時)。

*1 電気通信大学電気通信学部。(現:財団法人気象業務支援センター)。

*2 株式会社ウェザーニューズ SERVVE グループ。

*3 気象研究所予報研究部。

—1996年9月12日受領—

—1996年12月26日受理—

微分を表す) に関する11のパラメータを, 最小自乗法により推定できる (Waldteufel *et al.*, 1979). 実際には, 幾つかの影響の少ないパラメータを省略して推定が行われる. 本報告の場合は仰角 $0^\circ \sim 16^\circ$ のデータを用いており, 鉛直風速の動径速度への寄与は小さいので, Volume 中心における鉛直風速 (w_0) およびその空間微分 (w_x, w_y, w_z) を省略し, 残りの7パラメータ ($u'_0, v'_0, u_x, u_z, v_y, v_z, u_y + v_x$) について VVP による推定をおこなった. ここで, (u'_0, v'_0) は, (1) 式のように (u_0, v_0) に渦度 ζ と Volume 中心の座標 (原点: レーダーサイト) に関する項が付加されたものである.

$$\begin{aligned} u'_0 &= u_0 + 1/2 (y_0 \zeta) \\ v'_0 &= v_0 + 1/2 (x_0 \zeta) \end{aligned} \quad (1)$$

x_0, y_0 : Volume 中心の x 座標, y 座標

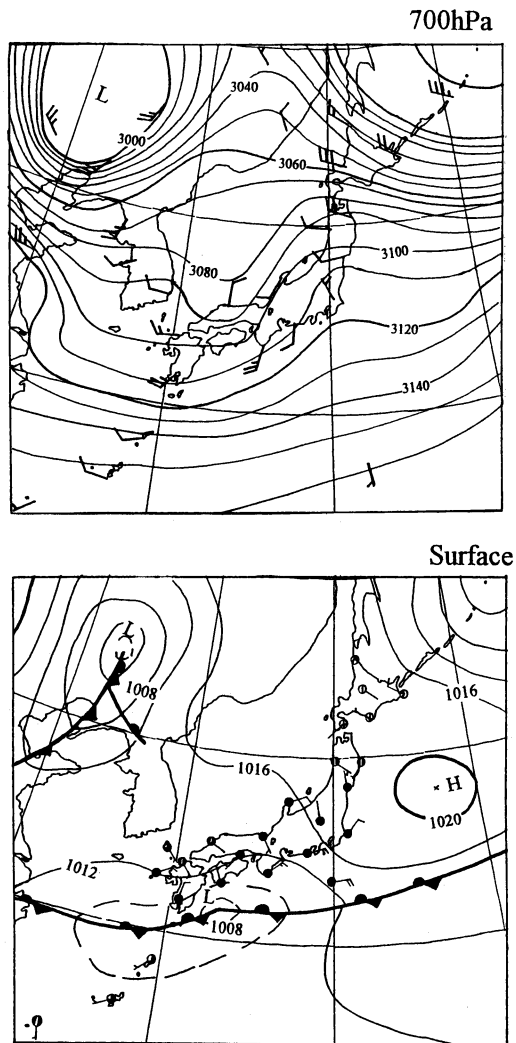
用いた動径速度データは, 第2図のように小低気圧が関東南岸沖の秋雨前線を通しての1993年9月22日15時, 気象研究所の5.7 cm波ドップラーレーダーによって観測したもので, 仰角は $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ$ および 16° に設定されていた. Volume のサイズは, 距離方向 10 km, 方位角幅は Volume の方位角方向の長さが 20 km 程度になるよう距離によって変えている. 鉛直方向には隣接する2つの仰角のデータを用いた. 第3図はこのような手法で推定された高度 2.5 km 付近の鉛直シアで, 10 km 間隔の格子点値で示してある. この値は, 周辺に存在する各 Volume において推定された鉛直シアから3次元的に内挿されたものである.

線形場の仮定が成り立つとすれば, 鉛直シアなど7パラメータの標準誤差は測定データのランダム誤差により生ずるものであり, 多変量解析の理論により (2) 式の共分散行列 C (7×7) の対角線要素の平方根で求められる (Koscielny *et al.*, 1982). s^2 は Volume 内の各測定点における残差の分散である (第3章参照).

$$C = G^{-1} s^2 \quad (2)$$

G : Volume 内の各測定点の座標で決る行列 (7×7)

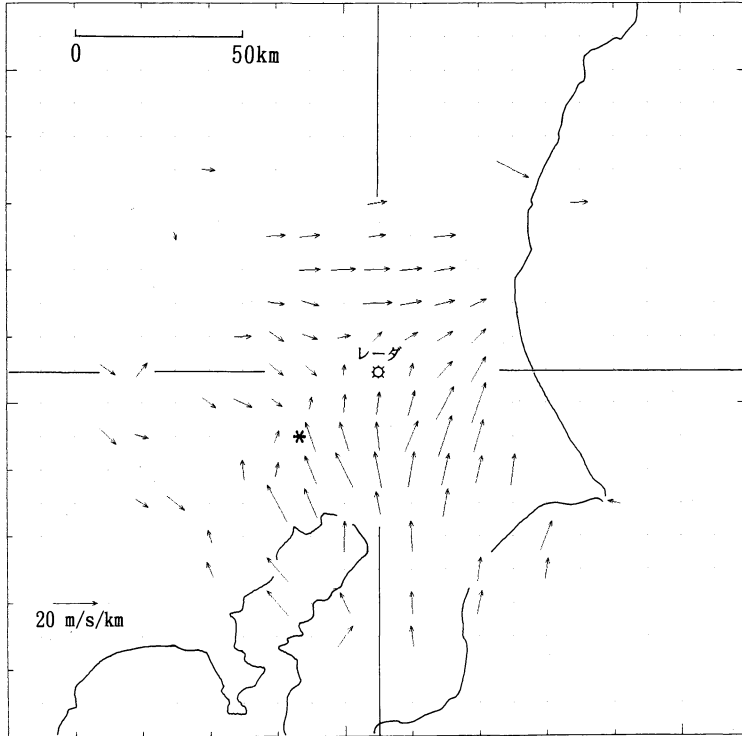
第3図の鉛直シアの内挿に用いた各 Volume について推定誤差を計算して見ると, すべて 1 m/s/km 以下で, 殆どが 0.5 m/s/km 以下である. 推定精度はかな



第2図 秋雨前線時の地上および700 hPa 天気図 (1993年9月22日9時).

りよいが, 実際の誤差には, さらに鉛直風速など4パラメータを省略したためのバイアス誤差と, Volume 内の風の非線形性に起因するバイアス誤差が加わることになる. この場合, (2) 式の行列 C から求めた誤差自体も単なるランダム誤差ではなく, バイアスや非線形性の影響が加算されたものになる. つまり実際のランダム誤差は (2) 式による値より小さく, 0.5 m/s/km を越えることはまずないと見てよい.

バイアスによる誤差は, 省略した4パラメータの上限を仮定すれば, やはり多変量解析の理論により (3) 式で見積もることができる. 対流活動が第1図のエコー強度分布からも分かるようにあまり活発ではない



第3図 7パラメータVVPによって推定された高度2.5 km 付近の鉛直シア (1993年9月22日15時).

ので、上限を $w_0: \pm 5 \text{ m/s}$, w_x と $w_y: \pm 0.5 \text{ m/s/km}$, $w_z: \pm 2 \text{ m/s/km}$ と設定すると、距離 10 km に中心を持つ各 volume でバイアス誤差が $\pm 0.5 \text{ m/s/km}$ 程度に達したが、その他の距離では殆どが $\pm 0.2 \text{ m/s/km}$ 以下であった。近距離では比較的大きい仰角の動径速度データを用いるので、鉛直風速関係のパラメータの影響が無視できなくなり、省略によるバイアス誤差が大きくなると考えられる。

$$\text{バイアス誤差} = AK \quad (3)$$

A: Volume内の各測定点の座標で決まる行列 (1×4)

$K^t: [w_0 \ w_x \ w_y \ w_z]$

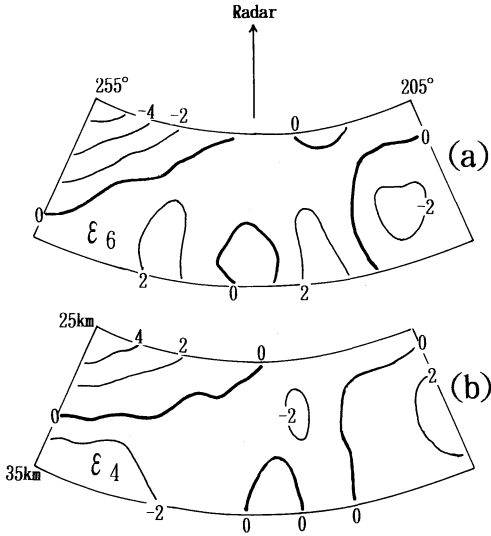
3. 風の場の非線形性に起因する誤差

非線形場に起因する誤差については、次のような考察を試みた。「Volume内の風の間が線形」という仮定が本当に成り立っていれば、Volume内の各点における動径速度は、VVPで求めた風のパラメータと各点の座標 (距離, 仰角, 方位角) から計算できる。もし風に非線形成分があれば、計算された動径速度は観測

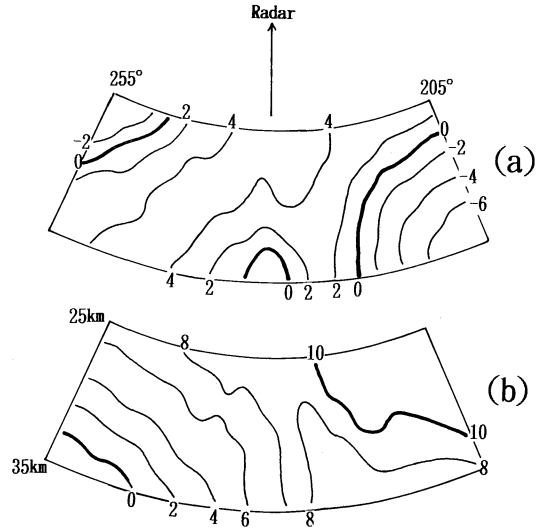
値と異なった値になる。両者の差がつまり最小自乗法における残差である。もっとも、動径速度の観測値はランダムな誤差を含んでいるので、Volume内の各点における残差がランダムに分布しているようなら、それは非線形性によるものでなく、ランダム誤差に起因するものであり、(2)式で見積もられる誤差の原因である。

第4図 a, b は非線形性の大きそうな Volume (第3図の*印が中心) の中での残差を示したものである。 ϵ_4, ϵ_6 はそれぞれ仰角 4° と 6° の走査面上の残差を示している。残差は最大 $5 \sim 6 \text{ m/s}$ 程度、どちらの走査面上でも分布はランダムではなく大きな偏りを示し、非線形性の存在を示唆している。なお、この Volume における鉛直シアの VVP 推定値は $u_z = -5.1 \text{ m/s/km}$, $v_z = 14.2 \text{ m/s/km}$, 残差の RMS は 1.69 m/s であった。

第5図 a, b は、第4図 a, b に対応する動径速度の分布である。このような動径速度分布を生ずるような風の間は、もちろん一義的には決まらない。しかし、風向についての情報があれば、元の風の間を構成できる。風向については、4章の簡略化 VVP による推定を



第4図 第3図の*印を中心とするVolumeにおける残差の分布(単位:m/s). (a)仰角6°, (b)仰角4°.



第5図 第3図の*印を中心とするVolumeにおける動径速度の分布(単位:m/s). (a)仰角6°, (b)仰角4°.

用いることとして風の場の構成を試みた。

構成された風の場について、Volume平均の鉛直シアを直接求めると $u_z = -7.3 \text{ m/s/km}$, $v_z = 15.0 \text{ m/s/km}$ となったが、これがVVPでは前述のように $u_z = -5.1 \text{ m/s/km}$, $v_z = 14.2 \text{ m/s/km}$ と推定されたわけである。差ベクトルの大きさを計算すると 2.4 m/s/km となり、これがVVPによる鉛直シア推定の誤差とみなせる。

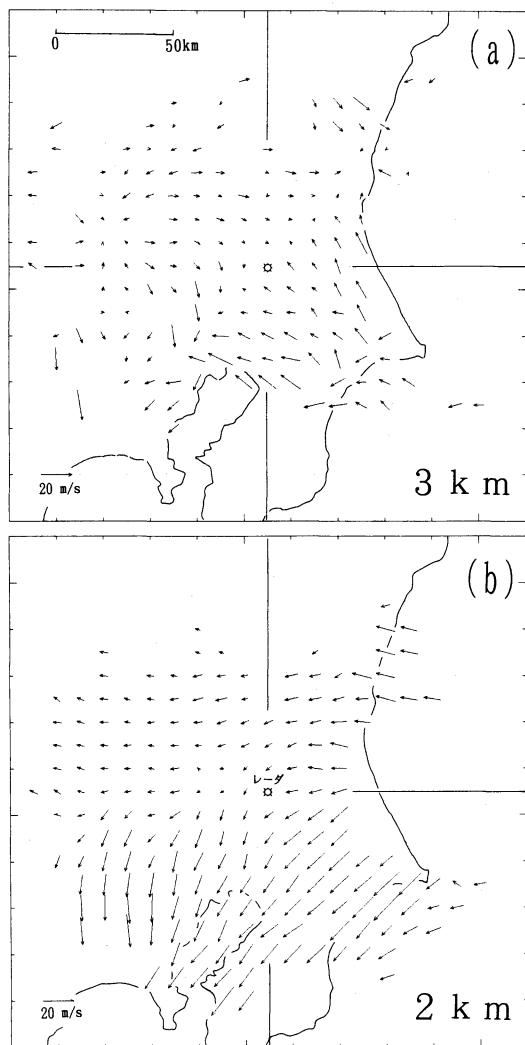
このVolumeにおけるランダム誤差は2章の手法により 0.6 m/s/km と推定されるが、非線形性の影響により過大に見積もられている筈である。またバイアス誤差の上限は、2章の手法で $\pm 0.2 \text{ m/s/km}$ と計算されるので、 2.4 m/s/km の大部分は非線形性に起因する誤差と考えてよからう。

結局、この秋雨前線に伴う降水域については、7パラメータVVPによる鉛直シアのRMSE (Root Mean Square Error) は、ランダム誤差として 0.5 m/s/km 以下、これに $\pm 0.5 \text{ m/s/km}$ を限度とするバイアス誤差が加わり、さらに、風の場の非線形性が大ききときは 2 m/s/km 程度の誤差が加算されることになる。以上を総合して、7パラメータVVPによる鉛直シアのRMSEは、非線形性の大きい領域でも 3 m/s/km 程度と考えることができる。

4. 簡略化VVPによる鉛直シア

(1) 式の示すように、VVPではVolume中心における風 (u_0, v_0) は推定できず、渦度を含む項が付随している。しかし「解析Volume内で風が線形」という仮定を強め、「解析Volume内で風が一樣」と仮定すれば (u_0, v_0) を求めることが可能になる。これを簡略化VVPと呼ぶことにする。立平・鈴木 (1994) はこの手法で関東地方の各高度における風向風速を 10 km メッシュ程度の分解能で推定し、航空機による風観測と比較して実用的な精度があることを示した。

第6図a, bは、第3図と同時刻の動径速度データに簡略化VVPを適用して得られた高度 2 km および 3 km の推定風ベクトルである。両者の差ベクトルから高度 $2 \text{ km} \sim 3 \text{ km}$ の鉛直シアが計算できる。この時刻の6時間前の地上天気図および 700 hPa 高層天気図は第2図のとおりで、総観スケールで見ると、関東地方では下層の北東風が次第に順転して、 700 hPa 付近の南風を経て 500 hPa では南西風になるといった風系である。高度 3 km では南風が卓越している筈であるが、第6図aに示されるように、メソスケールの北風領域が存在し、収束線を伴った複雑な構造を示している。



第6図 簡略化VVP法による推定風ベクトル (1993年9月22日15時)。(a)高度3km, (b)高度2km.

5. 7パラメータVVPと簡略化VVPによる鉛直シアの差

第3図の7パラメータVVPによる鉛直シアは、2つの仰角の動径速度データから計算されるが、各距離における2仰角のビーム高度の差は0.8~1.8km程度なので、第6図の簡略化VVPによる2kmと3kmの推定風から計算した鉛直シアと比較してみた。両者の差のRMS (Root Mean Square) は、4.9 m/s/kmであった。この2つの推定方式による誤差の間に相関がなければ、それぞれのRMSE (Root Mean Square Error) と差のRMSの間に次の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned} & \text{(簡略化VVP法と7パラメータVVP法} \\ & \text{との差のRMS)}^2 \\ & = \text{(簡略化VVP法のRMSE)}^2 \\ & + \text{(7パラメータVVP法のRMSE)}^2 \quad (4) \end{aligned}$$

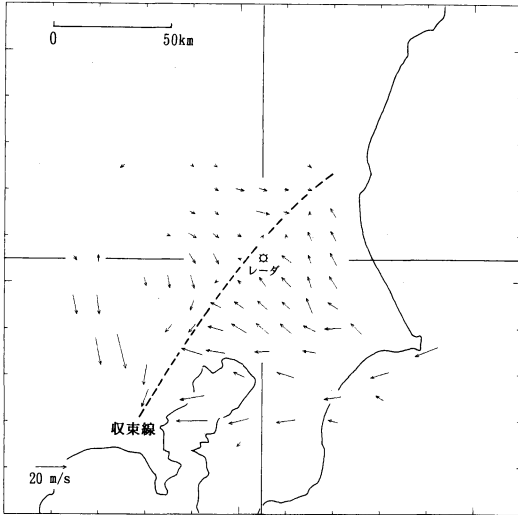
簡略化VVP法による風の推定誤差、従ってまた鉛直シアは過度とレーダーからの距離に大きく影響されるが、7パラメータVVP法の場合は過度や距離との関連はあまりない。従って両者の間の相関は小さいと考えられる。7パラメータVVPによる鉛直シアのRMSEは3章で述べたように3m/s/km以下と考えてよいので、(4)式から、簡略化VVPによる鉛直シアのRMSEは4.9~3.9m/s/kmと計算される。このRMSEは、2km面と3km面における風推定のRMSEの間に相関がない場合、両高度面のRMSEの和と考えてよい。つまり、それぞれの高度面の風推定(第6図)のRMSEは4.9~3.9m/s/km以下と見ることができる。

6. 鉛直シアを利用したVVP推定風の精度改善

簡略化VVP法による風の推定は「解析Volume内で風が一樣」と仮定しており、その誤差は過度やレーダーからの距離などに大きく依存し、見積もりは一般に容易でない。しかし、第6図bのような比較的一様な風系の場合は、仮定に無理がなく、推定精度は良いものと考えてよからう。

一方、7パラメータVVPによる鉛直シアは、より現実に近い仮定「解析Volume内で風が線形」なので、当然、簡略化VVP法よりも高い精度が期待できる。そこで、第6図aのような複雑な風系を直接に簡略化VVP法で求めず、その上下の高度に第6図bのような比較的一様な風系があれば、それに第3図のような鉛直シアを加算して間接的に求めるという手法で、精度改善が可能になる。

第7図はこのような手法で求められた高度3kmの風分布で、第6図aと比較して、40°~220°の方位に存在する収束線がより明確に描き出されていることが分かる。ただ鉛直シア加算法による第7図は、第6図aに比較し風ベクトルが推定できる格子点数がやや少ないことが短所である。これは、簡略化VVP法で直接的に求める場合は通常1つの仰角の動径速度データがあればよいが、鉛直シア加算の手法では最低2つの仰角の動径速度データが揃っている必要があるからである。



第7図 鉛直シア加算法による高度3 kmにおける推定風ベクトル (1993年9月22日15時).

7. まとめ

1台のドップラーレーダーの動径速度データから7パラメータVVPによって鉛直シアを推定する手法を

秋雨前線に伴う降水域に適用し、風の場の非線形性に起因するものも含めてその誤差を検討した。その結果、推定された鉛直シアのRMSEは、非線形性の大きい領域でも3 m/s/km程度であることが明らかにされた。

VVPでは風ベクトル自体の推定はできず、Volume内で風が一樣という仮定、つまり簡略化VVPに頼らざるをえないが、過度や非線形性の大きいときは誤差が著しい。そこで、7パラメータVVPによる鉛直シアが過度や非線形性の大きい風系においても実用的な精度を保持できることを利用し、上か下に比較的風の場の単純な高度面の存在するときは、それに鉛直シアを加算することによって複雑な風の場を推定するという手法を提案した。

参考文献

- Koscielny, A. J., R. J. Doviak and R. Rabin, 1982: Statistical considerations in the estimation of divergence from single-Doppler radar and application to prestorm boundary-layer observations, *J. Appl. Meteor.* **21**, 197-210.
- 立平良三, 鈴木修, 1994: 単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度, *天気*, **41**, 761-764.
- Waldteufel, P. and H. Corbin, 1979: On the analysis of single Doppler radar data, *J. Appl. Meteor.* **18**, 532-542.

Accuracy in Estimating Vertical Wind Shear from Single Doppler Radar

Ryozo Tatehira*¹, Yukiyasu Murata*² and Hiromu Seko*³

*¹ (Corresponding author) Faculty of Electro-Communications, The University of Electro-Communications (Present affiliation: Meteorological Business Support Center, Tokyo 101, Japan).

*² SERVVE Group, Weathernews Inc.

*³ Forecast Research Department, Meteorological Research Institute.

(Received 12 September 1996; Accepted 26 December 1996)