

単一ドップラレーダーによる上層風推定の 誤差特性と精度改善*

立 平 良 三*¹・笠 原 塔 子*²・鈴木 修*³

1. はじめに

ドップラレーダーの探知範囲内に任意の解析領域 (Volume) を設定し、この領域内で観測された動径速度から上層風速やその空間微分を推定する技術として、Waldteufel and Corbin (1979) により提案された VVP (Volume Velocity Processing) がある。ただし VVP では、風速と渦度を分離できないので、風速の推定には風速分布について何らかの仮定が必要である (Koscielny *et al.*, 1984)。最も簡略化された仮定は、Volume 内の風を一定とするものである。

立平・鈴木 (1994) はこのような簡略化された VVP 手法で上層風を推定し、航空機による風観測データと比較して、推定精度を調査した。双方のデータが時間について3分以内、位置について3 km 以内、高度について300 m 以内であった86個の標本について検証した結果、適当な平均化操作を行えば RMSE (Root Mean Square Error) は風向12.3°, 風速4.5 m/s となることが示された。

この簡略化 VVP では具体的には、まず Volume 内の動径速度分布を動径方向について平均し、次に方位角に応じて変化するこの平均動径速度にベストフィットする正弦曲線を求めることによって風向風速を計算している。これはこの正弦曲線を VAD 曲線 (Lhermitte and Atlas, 1961) とみなして風向風速を計算す

ることと同等で、局所 VAD と呼ぶこともできる。

今後さらに解析手法を改善して、精度向上を目指す必要があるが、一方では、推定誤差の特性を調査して、個々の推定風速値に含まれる誤差の程度を評価する手法を開発することも有用である。つまり誤差に応じた重みを付けて解析に利用するなどの手法が使えるからである。本研究では、個々の推定風の誤差を見積もる方法を提案し、またその方法を利用して、Volume 内にシアラインのような急激な変化を含む場合に、推定風の精度を改善するアルゴリズムを提案する。

2. ドップラレーダーによる推定風の誤差特性

立平・鈴木 (1994) によれば、平均化操作前の簡略化 VVP 推定風を航空機観測と比較すると、差の RMS (Root Mean Square) は風向17.5°, 風速8.0 m/s であった。なお、差をベクトルで表現した場合、その絶対値の RMS は8.7 m/s であった。この86例の風向風速の範囲は航空機観測でみて、風速は7~30 m/s (平均風速26.6 m/s)、風向は188°~228°だったので、平均風速の約33%に相当する差があることになる。

次にこのような簡略化された VVP 法による推定誤差の大きさを支配する要因を考察する。個々の推定風の誤差は、真の値が分らないと計算できないが、航空機による風観測値はかなり精度が良いと考えられるので、これを真値とみなすことにした。航空機観測の精度は、日本航空社内資料によると風向の RMSE 5°程度、風速の RMSE 2 m/s 程度とされている (立平・鈴木, 1994)。さらにこれを確めるため「VVP 推定風と航空機観測の差」を用いて次のような解析を行った。

前述の86例について、VVP 推定風と航空機観測の差ベクトルを動径方向成分と方位角方向成分に分けると、RMS でそれぞれ2.8 m/s, 7.5 m/s となった。風の動径方向成分はドップラレーダーで十分な精度で測定できる筈であるから、差の動径成分2.8 m/s は主

* Error characteristic and improvement in estimating upper wind from single-Doppler radar.

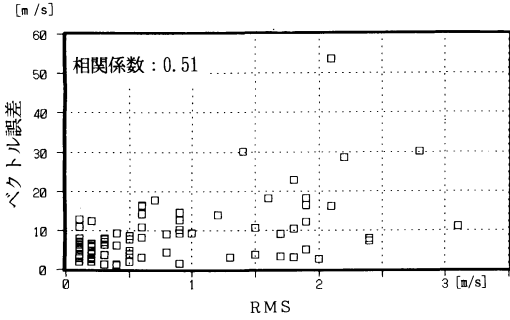
*¹ Ryoza Tatehira, 電気通信大学電気通信学部.

*² Touko Kasahara, シャープ株式会社液晶天理事業本部第3プロセス技術部.

*³ Osamu Suzuki, 気象研究所気象衛星・観測システム研究部.

—1995年6月12日受領—

—1995年7月24日受理—



第1図 ベクトル誤差の絶対値と RMS との相関。

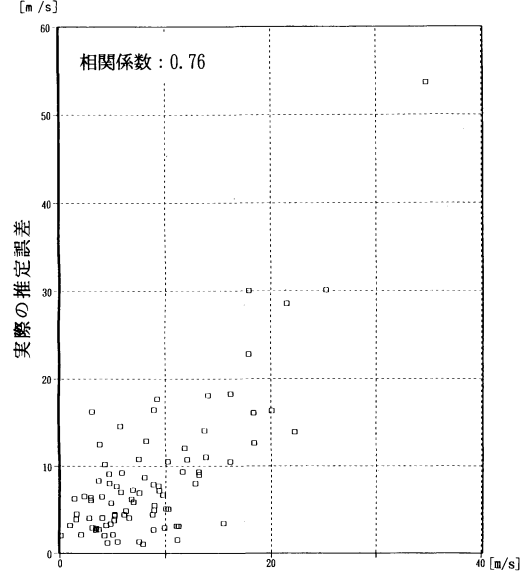
として航空機観測の誤差と考えてよい。方位角方向にも同程度の誤差がある筈だから、合成すると航空機観測のベクトル誤差は 4 m/s 程度と推定される。ただし、動径方向の誤差 2.8 m/s の中には、ドップラーレーダー観測と航空機観測との位置・時刻のズレによる差も含まれるので、実際の航空機観測の誤差はこれよりも小さいと考えられ、日本航空社内資料の示す精度はほぼ妥当と考えられる。

ドップラー推定風の誤差に関係しそうな要因として、まず Volume 内の動径速度分布に正弦曲線をベストフィットさせる際の残差の RMS を調べた。RMS とベクトル誤差の絶対値との相関係数は 0.51 となり、かなり大きい相関である。つまり、Volume 内の風の一様性の仮定が崩れ、風が乱れているほど推定誤差が大きくなるということ、当然の結果といえよう（第1図参照）。

次に風とレーダービームが交差する角度（交差角）と「ベクトル誤差」との関係を見ると、交差角が大きくなるほど誤差が増大する傾向があり、相関係数は 0.25 であった。ただし、真の風向は分からないので、VVP 推定風の風向を使った。

交差角が 0° に近い場合は、正弦曲線の極大あるいは極小近辺の動径速度データから曲線全体を推定することになり、推定される曲線の振幅よりも位相のずれが大きくなる、つまり風向の推定誤差が大きくなる筈である。一方、交差角が 90° に近くなると正弦曲線が横軸（方位角軸）を横切るあたりの動径速度データから曲線を推定するので、位相（風向）の誤差は抑えられ、風速誤差が大きくなろう。ベクトル誤差の大きさは両者の総合であるが、交差角の大きい所での風速誤差の拡大の方が卓越していると考えられる。

また推定誤差は風速が大きいのほど増大することが期待される。真風速が分からないので、推定風速で代用



回帰式で計算した推定誤差
(因子: RMS, 交差角, 推定風速, RMS^2 , 交差角²)

第2図 回帰式によって見積った誤差の散布図。

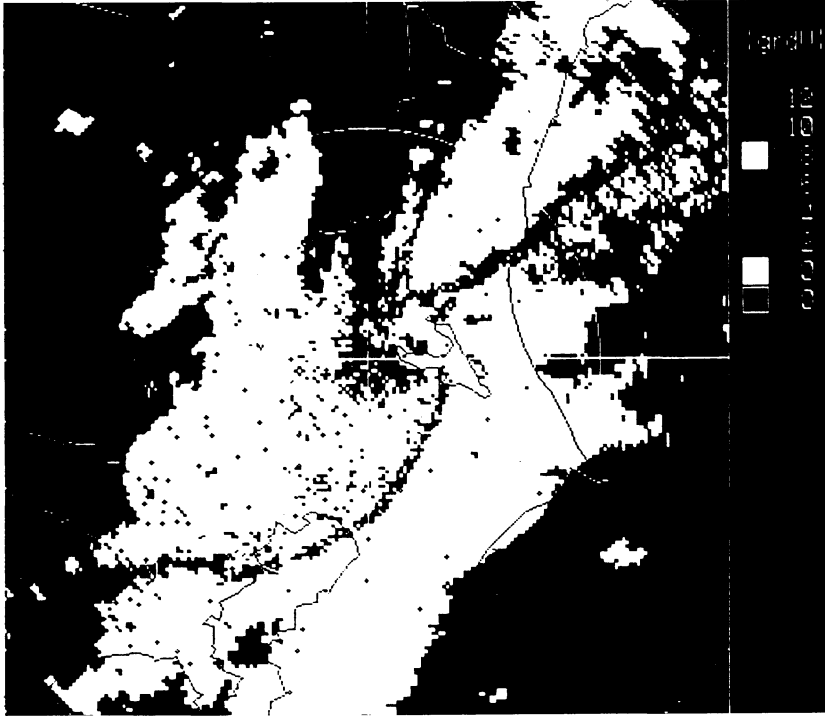
して相関係数を計算すると 0.56 で、かなりの相関が認められた。

誤差に影響する要因として、他にも距離や高度などを調べたが、相関係数はいずれも 0.2 以下であった。そこで、「交差角」と「RMS」、またそれぞれの 2 乗（「 RMS^2 」と「交差角²」）、および「推定風速」という 5 因子で(1)式のような重相関回帰式を作成した。因子の数を制限したのは、その方が重相関回帰式を独立データに適用した場合に、相関係数の低下を防げるからである。

$$\begin{aligned} \text{推定誤差} = & -15.9 + 9.3 \text{ RMS} + 0.32 \text{ 交差角} \\ & + 0.45 \text{ 推定風速} - 1.87 \text{ RMS}^2 - 0.0027 \text{ 交差角}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

{ 単位………推定誤差, 推定風速, RMS: m/s }
交差角: deg

式(1)の回帰式で計算した推定誤差と実際の推定誤差との相関係数は 0.76 にまで向上した（第2図参照）。この回帰式の因子はすべてドップラーレーダー観測の際に即時的に得られるもので、簡略化 VVP で求めた個々の推定風の誤差をリアルタイムに評価することを可能にする。誤差が見積もれば、誤差の大きい推定風を除去するとか、ウェイトを下げて使うとかの方法で、推定風によるメソスケール解析の精度向上に利用できよう。



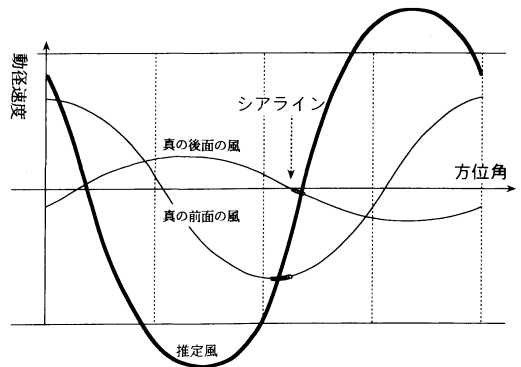
第3図 1989年1月20日20時27分における動径速度の勾配(気象研究所 C-Band ドップラーレーダー, 仰角0.6°).

3. シアライン周辺における推定アルゴリズム

2節で取扱ったエコー域は、弱い層状エコー域の中に並〜強の中小スケールの対流性エコー域が混在するといったものであった。このような場合、Volumeの中に局所的な風の急変が存在する可能性は小さいと考えられる。

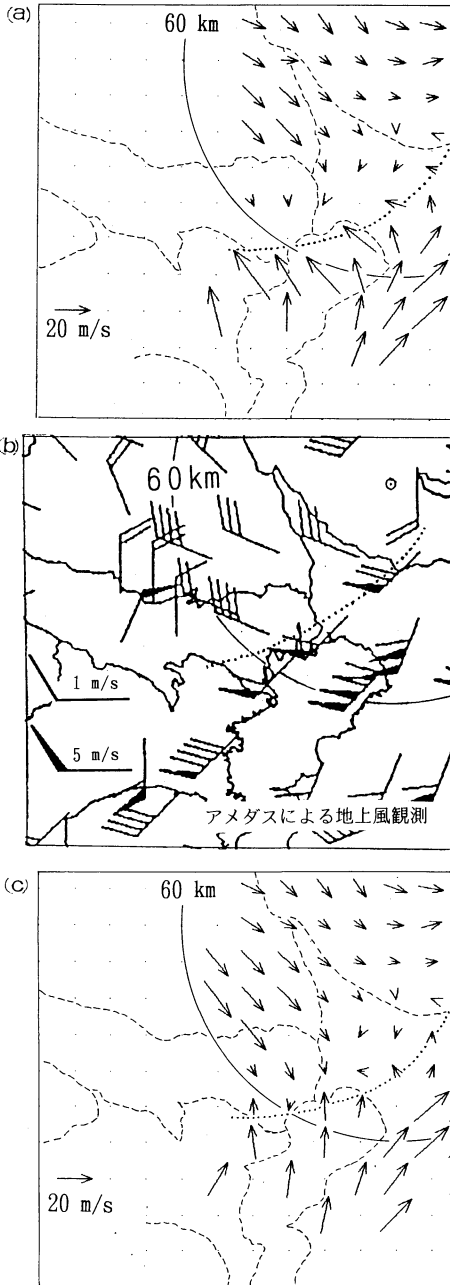
これに反し、第3図のように顕著なシアラインが検出される場合もしばしばある。この図は1989年1月20日20時27分における動径速度の勾配を示すもので、白抜きのエコー域内に1 kmあたり2 m/s以上の勾配域が2 m/s刻みで表示されている(原図はカラー)。関東南部の顕著なシアラインでは1 kmあたり最大8 m/s以上の勾配が存在していた。

このようなシアラインがVolume内にあると、第4図にモデル的に示すように、別々のVAD曲線に沿った2つのグループの動径速度データに1つの正弦曲線をフィットさせることになり、得られる推定風はシアラインのどちら側の風とも大きく異なったものになる。そこでVolume内にシアラインのあるときにも対応できるようなアルゴリズムを簡略化VVPに付加することを考えた。

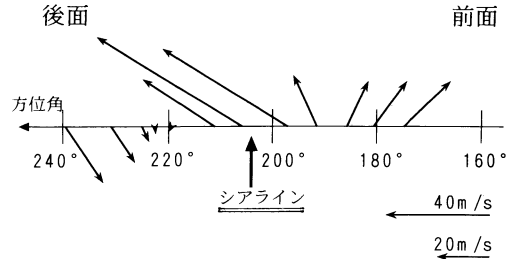


第4図 Volume内にシアラインを含む場合の簡略化VVPの模式図。

第5図(a)は1節で説明した簡略化VVPで第3図の関東南部のシアライン周辺の上層風(高度1 km)を推定した結果である。ただし、このときの気象研究所ドップラーレーダーのデータは方位角1.4°ごとに収録されており、方位角幅約22°(16方位角)、距離幅10 kmのVolumeを用いている。また精度を上げるため、隣のVolumeの推定風との平均化操作を行っている(立平・鈴木, 1994)。



第5図 (a)ドップラーレーダーによる高度1 kmの推定風分布(1989年1月20日20時27分). (b)アメダスによる地上風観測(1989年1月20日20時). (c)第5図(a)と同じ,ただし,2分割アルゴリズム付加後.



第6図 60 km 距離円に沿うシアライン付近の推定風(仰角0.6°, 高度約0.8 km).

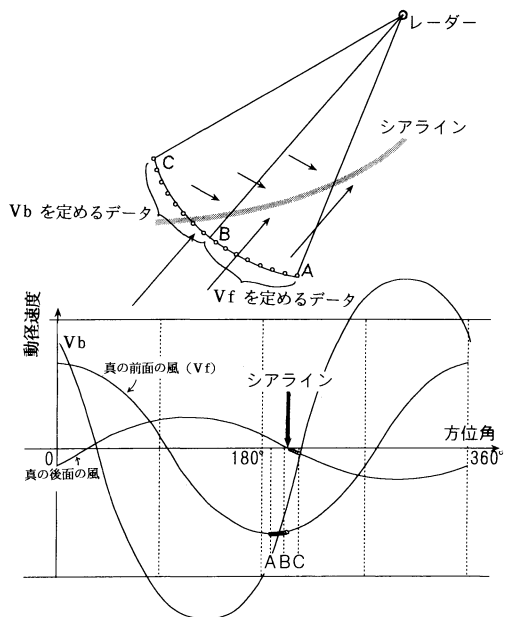
上層風の推定は各仰角ごとに行い, その結果を10×10 km 格子点上の各高度(1 km 間隔)に内挿することによって, 第5図(a)のような図が高度1 km ごとに作成できる. 第5図(b)に比較のためほぼ同時刻のアメダスによる地上風分布を示す. 高度1 kmの推定風(第5図(a))には, アメダスでは観測されていない南東風がシアライン周辺に認められる.

この南東風を詳しく調べるために, 60 km 距離円に沿って Volume を少しずつずらして簡略化 VVP で風向風速を推定すると第6図のようになる. Volume 内にシアラインが存在すると, そのどちら側とも違った異常な南東風が推定される場合のあることが分かる. このような異常な推定になるのは第4図で説明した理由によるものと考えられる. この対策として, 簡略化 VVP に次のようなアルゴリズムを付加することを試みた.

第7図のように Volume を2分割し, 前半部の Volume からの推定風を V_f , 後半部からの推定風を V_b とし, その2つの推定風を比較する. その差が一定のしきい値(ここでは風速10 m/s, または風向45°と設定)を越えたときは Volume 中にシアラインが存在すると判断し, V_f と V_b のうち正弦曲線フィットの際の RMS の小さい方を選択するというアルゴリズムである.

第7図では, Volume の後半部がシアラインを含んでいるが, このデータに正弦波をフィットさせて V_b を推定すれば, RMS が大きくなることは明らかである(第7図下). このようなアルゴリズムを付加することにより, シアラインの影響の少ない方の推定風を選択できると考えた. しきい値を越えない場合は, Volume 全体からの推定風を採用することになる.

2節の結果によれば, 推定誤差は RMS と交差角および推定風速の3因子に関連している. Volume を2



第7図 シアライン付近の風速推定を改善するアルゴリズム (2分割アルゴリズム).

分割する場合、交差角は前半部と後半部で殆ど差がなく、風速はまだ推定されていないわけだから、結局このアルゴリズムでは RMS のみを選択基準にした。

この2分割アルゴリズムを用いて推定した結果 (高度 1 km) を第5図 (c) に示す。先に第5図 (a) に見られたシアライン付近の異常な南東風が南～南西に修正され、アメダス観測との類似がかなり良くなっている。

4. まとめ

簡略化された VVP 法による推定誤差の大きさを支配する要因を考察し、推定誤差を見積もる重相関回帰式を作成した。この回帰式で計算した誤差と実際の誤差との相関係数は0.76とかなり高く、簡略化 VVP で求めた個々の推定風の誤差をかなりの精度で計算できることになる。この誤差の大きさに応じて推定風に重みをつけて利用することにより、推定風によるメソスケール解析の精度向上が期待できる。

本論文で提案した回帰式は特定の日 (1992年11月20日) についての結果なので、更に違ったタイプの降水域について追試が必要である。しかし、推定誤差が RMS や風速などこの回帰式の因子と関係が深いことは、一般的な性質と考えて良さそうである。

シアラインのような局所的な風の急変域が Volume の一部に含まれている場合には、一様性の仮定が大きく崩れるため大きな誤差を生ずる可能性がある。しかし、3節で提案した2分割アルゴリズムを付加することによりその影響が軽減でき、推定精度の低下を押さえられることが分かった。

しかし、例えば台風などのように、強い過度や変形が局所的ではなく Volume 内に広く分布している場合には、2分割アルゴリズムは効果がない。一般に、このような風の場合には Volume 内で一様風という仮定は崩れ、簡略化 VVP 法による風推定は大きな誤差を伴う。しかも誤差が大きくても、正弦曲線をフィットさせる際の RMS が必ずしも大きくならないので、推定精度の評価も難しい。簡略化 VVP における Volume 内で風が一様といった仮定を緩めて、渦、変形のような規則性のある乱れが Volume 中に遍在するような場合にも精度が維持できるような推定技術の開発が必要である。

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.
- Lhermitte, R. M. and D. Atlas, 1961 : Precipitation motion by pulse Doppler radar, *Proc. 9th Weather Radar Conf.*, 218-223.
- 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.