

単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度*

立 平 良 三**・鈴 木 修***

1. はじめに

気象ドップラーレーダーが測定するのは降水粒子の動径速度であって、これから風向風速を推定するために、これまで色々な手法が開発されてきた。もっとも直接的なのは二台のドップラーレーダーで測定された二方向の動径速度を合成する手法で、例えば積乱雲内の三次元風速の詳細な分布を1 km 程度のメッシュで描き出すことができる。

しかし、二台のドップラーレーダーで同期をとって観測し合成するのは手間のかかることであり、また観測可能範囲も単一レーダーの探知範囲よりずっと狭いものとなる。このため、米国で進行中のNEXRAD計画でも、単一ドップラーレーダーを利用してなんとか風向風速の推定、あるいは渦とか発散のような特徴的な風速場を検出しようという立場をとっている。

単一ドップラーレーダーでレーダーサイト直上の各高度の水平風速を推定する手法としては、Lhermitte and Atlas (1961) によって VAD 法が提案されている。VAD (Velocity Azimuth Display) 法というのは、仰角を一定にして、特定距離からの動径速度を測定し、その方位角による変化曲線 (VAD 曲線) から水平風速を推定するものである。さらに、Browning and Wexler (1968) は、VAD 法によってレーダーサイト直上の水平発散や変形も推定できることを示している。

その後、レーダー探知範囲内の任意の地点の水平風速や発散などを推定する手法として、Waldteufel and Corbin (1979) は VVP (Volume Velocity Processing) 法を提案した。この手法は VAD 法の思想を発展させたものと言うことができる。

本研究では、簡略化された VVP 法 (局所 VAD 法) によって推定した各高度の水平風速の精度を、成田および羽田に離着陸する航空機が観測した風速と比較することによって評価し、メソスケール風速場の解析の可能性について考察した。

2. VVP 法による上層風の推定

VVP 法では、レーダーの探知範囲内に動径方向 10 ~ 30 km, 方位角幅 10 ~ 40°, 仰角幅 1 ~ 2° 程度の領域 (Volume) をとり、その中の三次元風速分布が Volume 中心についてのテーラー展開の一次項までで近似できるものと仮定する。この仮定のもとで、Volume 内の実測の動径速度分布にベストフィットするように、最小自乗法でテーラー展開の各項を決めれば、Volume 中心における三次元風速およびその一次微分に関する 11 のパラメータが推定できることになる。

残念なことに、水平風速は鉛直渦度と組合わされた形で 11 パラメータの中に含まれており、水平風速そのものは推定できない。しかし、実際には状況に応じて適当な仮定をすれば、パラメータの数を減らして水平風速そのものも推定することができる。

一般に、VVP 法では Volume を大きくするほど精度は向上するが、その代わり風速場の細かい構造は把握できなくなる。この研究では数十 km 程度のスケールのメソスケールの風速場を解析することを目標として、Volume として動径方向 10 km, 方位角幅約 16° の扇形領域をとった。仰角については簡略化して一仰角のみとした (第 1 図)。

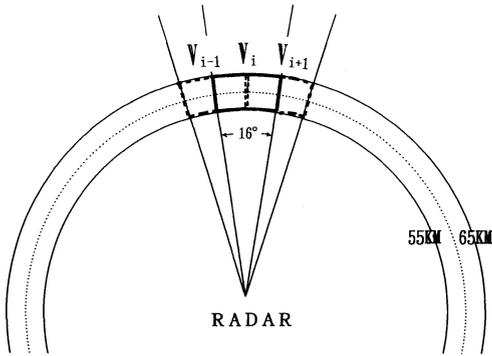
Volume 中の動径速度の具体的な処理方法としては、時々刻々リアルタイムにレーダー探知範囲内の風速分布を表示させることを目標に次のようなアルゴリズムの簡略化を行っている。まず Volume は風向風速は一様という最も簡単な仮定を採用する。次に、動径方向の 10 km について動径速度の平均値を計算する。

* Accuracy in Estimation of Wind Velocity from Single Doppler Radar.

** Ryozo Tatehira, 電気通信大学.

*** Osamu Suzuki, 気象研究所.

© 1994 日本気象学会



第1図 簡略化 VVP 法 (局所 VAD 法) における Volume の設定. i は太線で囲まれた volume の番号. $i-1$, $i+1$ は隣接する volume (破線) の番号.

気象研究所のドップラーレーダーは 0.5 km 毎に動径速度を測定しているの、21個の平均をとることになる。この研究では、主として仰角 6° 付近までの動径速度を使用しているの、この平均値は高度にすれば ± 0.5 km 以内の範囲を平均していることになる。つまり、この手法では高度分解能は 1 km 程度ということである。

気象研究所のドップラーレーダーは、方位角方向にはビーム半幅幅に相当する 1.05° 毎に動径速度を測定しているが、繰返し周波数を交互に 1120 Hz と 896 Hz に切り替え、隣接する 2 方位角を組み合わせる「折り返し」の補正ができるようになっている。この補正により、観測可能な最大動径速度は ± 16 m/s から ± 64 m/s に拡大されている。結局、方位角幅約 16° の Volume の中で、方位角 2.10° 毎に 8 個の 10 km 平均動径速度が得られることになる。

この 8 個の平均動径速度は、一定仰角のビーム上にある距離一定の点が描く円弧上の値であり、「はじめに」で説明した VAD 曲線の一部とみなすこともできる。この意味で、本研究の手法は局所 VAD 法と呼ぶこともできる。

厳密にいうと、動径速度には降水粒子の落下速度の動径成分も含まれているが、本研究では主として仰角 6° 程度までのデータを用いているので、この成分は近似的に無視できる。この近似の下で、円弧上の動径速度から最小自乗法で水平風速を推定するには、具体的には次のようにすればよい。

ここでは、Volume 内で一様な風を仮定しているので、風に関するパラメータは水平風速 (u, v) のみとなる。 u, v とドップラーレーダーで測定された動径速度

v_r との間には式 (1) が式り立つ。

$$v_r = u \cos \theta \sin \phi + v \cos \theta \cos \phi$$

θ : 仰角 ϕ : 方位角

(1)

本研究の場合、それぞれの仰角について、 2.1° 間隔の方位角 ϕ_i ($i=1\sim 8$) で測定した動径速度 v_{ri} が与えられているわけである。この ϕ_i, v_{ri} にベストフィットするように式 (1) の係数 u, v を最小自乗法で決めれば、それが水平風速の東西、南北成分の推定値であり、推定風向風速が計算される。

扇形の Volume は距離 10 km ごと、第 1 図に示すように方位角は約 8° ずつずらして、オーバーラップさせて設定した。さらに、各扇形領域について推定された水平風速 V_i を方位角方向に移動平均を行い、スムージングすることによって精度改善を試みた。この移動平均では、両隣りの推定風速ベクトル (V_{i-1}, V_{i+1}) に $1/2$ の重みを付け、これと V_i の平均をとって扇形 i のスムージング風速ベクトルとした。

3. 航空機の風観測

航空機には機首方向に開口したピトー管が装備されており、対気速度が測定できる。一方、対地速度は慣性航法により決定されているので、そのベクトル差から風向風速が求められる。過去の測定データの統計によると、風速測定値の 95% は 8 ノット以下の誤差であったことが示されている (日本航空社内資料による)。また風向測定値の誤差は風速が 0 に近付くと共に指数関数的に増大するが、風速が 25 ノット以上の場合の誤差は 95% が 10° 以下とされている。もし風向風速の誤差が正規分布するものと仮定すると、上記の誤差は RMSE (Root Mean Square Error) に換算して、それぞれ 2 m/s と 5° に相当する。

航空機が航行速度を変えたり風のシヤー領域を通過したりする場合、横風を受けるので機首方向に開口したピトー管は対気速度を正確に測定しない。従って、航空機による風速測定の精度は低下する筈である。本研究で比較に用いたのは羽田および成田の周辺における離着陸時のデータであるから、その誤差は上記の一般的な場合より幾分大きくなっている可能性がある。

4. 比較観測の結果と精度評価

1992年11月20日、南岸沿いに進む低気圧の通過に伴い、メソスケールのエコー域が つぎつぎに関東地方を北東進 (約 90 km/hr) した。11時から15時の間の動径速度データから 2 章で説明した簡略化 VVP 法 (局所

第1表 動径速度を下回る航空機観測の例.

動径速度	航空機観測	ドップラーレーダーによる推定風
-14.9 m/s	223° 11 m/s	185° 17 m/s
-29.5 m/s	213° 22 m/s	239° 32 m/s
-24.0 m/s	188° 20 m/s	176° 29 m/s

VAD法で風向風速を推定し、成田および羽田に離着陸する航空機の風観測と比較した。高度6 kmまでの範囲で航空機は最大40 km/s程度の強風を観測していたが、「折り返し」補正により、動径速度は支障なく観測できていた。

双方のデータが、時間について3分以内(エコー域の移動距離にして約5 km)、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個のサンプルについて検証した結果、航空機観測とドップラーレーダーによる推定風向風速との差のRMS (Root Mean Square) は17.5度および8.0 m/sとかなり大きい値を示している。なお、86例の風向風速の範囲は航空機観測で見て、風速は7~30 m/s(平均風速26.6 m/s)、風向は188°~228°であった。

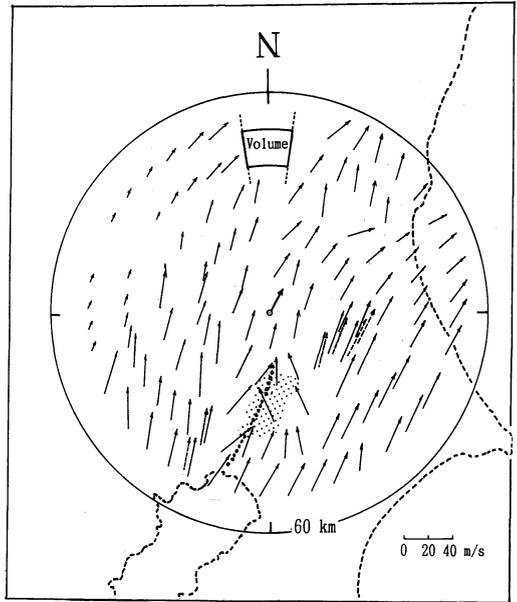
次に2章で説明したスムージングを施したあとの推定風向風速を航空機観測と比較してみると、風向差のRMSは13.3度、風速差のRMSは4.9 m/sと大幅に差が縮小し、スムージングの改善効果は顕著である。

航空機観測が全く誤差を含まないのなら、上記のRMSを真の風に対するRMSE (Root Mean Square Error)と見なせるが、航空機観測の方も3章で説明したような誤差を伴っている。ここで、航空機およびドップラーレーダーによる風観測の誤差の間に相関がなく、またどちらの観測でも「偏り」が無視できる程度とすれば、(2)式の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 & (\text{航空機観測とドップラーレーダー観測の差のRMS})^2 \\
 &= (\text{航空機観測のRMSE})^2 + \\
 & (\text{ドップラーレーダー観測のRMSE})^2 \quad (2)
 \end{aligned}$$

スムージングを施したあとの推定風向風速について、式(2)によってドップラーレーダー観測のRMSEを計算してみると、風向:12.3°, 風速:4.5 m/sとなり、実用に耐える精度と考えられる。

3章で説明したように、成田および羽田に離着陸する航空機の風観測は、定常的な飛行時より誤差が大きくなっていることを考慮すると、ドップラーレーダーの風推定の精度はもう少し良いのかも知れない。次の事実もこれを裏付けるものと考えられる。



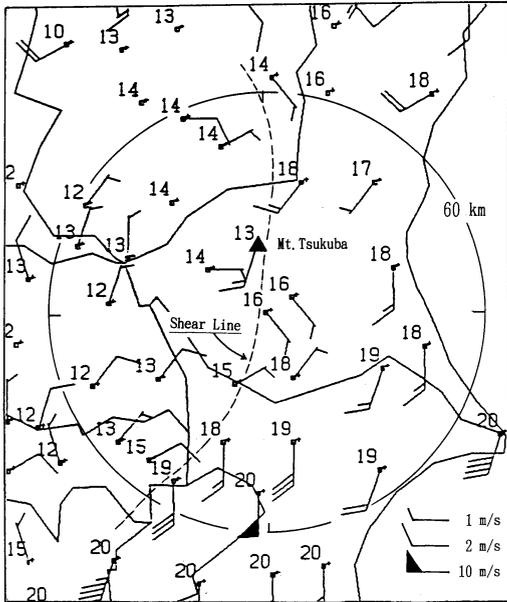
第2図 1992年11月20日14時51分のドップラーレーダーによる推定風速ベクトル(高度0.7~1.4 km, スムージング後)。破線は航空機で観測された対応する風速ベクトル、中心の太実線は15時の館野のレーウィン観測(高度975 m)。中心の南方に明瞭な収束線(点線)が認められるが、これは45 dBZ以上のまとまった強エコー域(点彩)に対応している。

ドップラーレーダーで測定する動径速度は、水平風速の成分であるから、「|動径速度| ≤ 水平風速」の関係にある。しかるに、航空機観測の風速が動径速度の絶対値をかなり下回るケースが86例の中に3例あった(第1表)。

この3例を取除き、83例についてドップラーレーダーによる風推定のRMSEを計算すると最終的に11.5°と4.3 m/sとなる。上記のような矛盾は動径速度と風速がほぼ平行するときのみ検出可能なことを考慮すると、実際のRMSEはもう少し減少する可能性がある。

ドップラーレーダーによる推定風速の例として、エコー域が比較的まとまっていた14時51分の高度1 km付近の状況を第2図に示す。推定風速ベクトル(実線)のなかで、6例が航空機の風観測と対応が可能で、航空機による風を破線ベクトルで記入してある。明瞭な収束線(点線)に対応して強エコー域(点彩)が存在していた。館野のレーウィン観測との対応もよい。

第3図に比較のため、15時のアメダス風速分布を示



第3図 1992年11月20日15時のアメダス風速分布。関東平野を南北に横切るシヤーライン(破線)が認められる。

す。シヤーライン(破線)の西側には下層付近に薄く寒気が入っている模様で、第2図の1 km 付近の風とは逆に北寄りの風になっている。しかし、シヤーラインの東側では、高度の差とかアメダス風が近接地物の影響を受けやすいことなどを考えれば、一応の類似が認められる。

5. まとめ

この研究ではルーチン予報作業への利用を念頭に置いて、Volume 内で風が一樣という最も簡単な仮定のもとに VVP 法で水平風速を推定したが、それでも数十 km スケールの系の風解析に利用できそうな風向風速分布を描きだすことができた。今後、Volume の取り方を変えたり、仮定の置き方を工夫したりすることによって、精度を改善する可能性が残されている。また二つの仰角で観測した動径速度を用いれば、水平発

散など幾つかの風速場のパラメータを推測することも可能になる (Koscielny *et al.*, 1982)。

航空機観測との比較を実施した日の雨域は、弱い地雨性の雨域のなかに 10~30 mm/hr の数十 km スケールの対流性強雨域が混在するといったパターンであった。強雨のパターンとしては、熱雷に伴うような孤立した対流性雨域の散在といったものもあるが、このような場合に簡略化 VVP 法(局所 VAD 法)がどの程度使えるのか検証しておく必要がある。

ドップラーレーダーによる上層風推定を実用化するためには、推定精度向上がまず必要であるが、個々の推定風向風速がどの程度の精度かが見積もれることも有用である。例えば、Volume 内の方位角 ϕ_1 、動径速度 v_{r1} にベストフィットするように風速 (u, v) を最小自乗法で決める際の残差の分散とか、風向と動径方向の交角など推定精度と相関がありそうなものが幾つか考えられ、今後の課題としたい。

謝辞

この研究を行うにあたって、航空機による風観測のデータを提供いただいた日本航空および全日空輸の関係者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- Browning, K. A. and R. Wexler, 1968 : A Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler-radar, *J. Appl. Met.*, 7, 105-113.
- 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. Met.*, 21, 197-210.
- Lhermitte, R. M. and D. Atlas, 1961 : Precipitation Motion by Pulse Doppler Radar, *Proc. 9th Weather Radar Conf.*, 218-223.
- Waldteufel, P. and H. Corbin, 1979 : On the Analysis of Single-Doppler Radar Data, *J. Appl. Met.*, 18, 532-542.