

ファンビーム・ドップラーレーダーを使用した 水平風測定におけるスペクトルの考察

上田 博*・八木鶴平*

国立防災科学技術センター

Some Considerations on the Doppler Spectrum of the Horizontal Wind Velocity as Measured by a Fan-Beam Radar

By

Hiroshi Uyeda and Tsuruhei Yagi

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

Observations of the horizontal wind velocity were made using a fan-beam Doppler radar as used for airport surveillance with the wavelength of 11 cm. The observation was made at Mitaka, Tokyo from Sep. 10 to Oct. 10, 1979. The purpose of this observation was to measure the horizontal wind velocity, easily and on the real-time basis.

The horizontal wind velocity was calculated from the combination of two radial components of wind velocity (Uyeda and Yagi, 1980). These components were measured at several selected points within the radar echoes of the rainfall. For the calculation, an assumption was made that the horizontal wind velocities were uniform in and around the area including the two measuring points for each combination.

The Doppler spectra of rain echo were obtained at 89 measuring points. For each spectrum, the mean value above the noise level, the mean value above the -3dB level and the peak value were calculated. With these values the characteristics of the Doppler spectra were investigated, and the following conclusions were made:

- (1) The mean value above the noise level is appropriate as the Doppler velocity to calculate the horizontal wind velocity.
- (2) The resolution for the Doppler velocity should, in practice, be selected from 0.1 to 0.5 m/sec, according to the expected accuracy in measurement.
- (3) The observation of horizontal wind structure with height using a pencil-beam Doppler radar is found to be important to clarify the cause of secondary peaks.

* 第1研究部異常気候防災研究室

It was ascertained that the short-time forecasting method for rainfall, which is under contemplation, would be practical by measuring horizontal wind velocity in real-time with Doppler radar.

1. 緒 言

例年集中豪雨による被害は後を絶たない。集中豪雨は限られた範囲に短時間のうちに集中的な雨を降らせ、局地的な大被害をもたらす。このような集中豪雨に対しては、地域に即した降雨予報が必要であると考えられる。すなわち、その地域での降水量と降水時間の予測の精度があがり、必要な連絡体制が整えば、集中豪雨による被害はかなり軽減されるであろう。そのためには、あとどれくらいの時間でどの程度の降水量があるかについての短時間予測ができなければならない。

降雨の短時間予測を行なうためには、雨域の移動や発達、減衰を把握する必要があるが、雨域の発達あるいは減衰に関して、降雨の種類や力学的な機構に関わる複雑な問題が多くあり、その取り扱いが困難である。しかし、1～2時間程度の将来予測に対して、その降雨現象に持続性を仮定すれば、雨域の移動を把握することにより、第一次近似として単純な運動学的外挿で予測が可能となると考えられる。

雨域の移動はその降雨に対するレーダーエコーの移動として把握できるが、過去1～2時間程度のエコーパターンを記録・解析する必要がある。災害が予想される現場での迅速な対応には適し難い。また、エコーパターンの時間的な追跡における同定は困難な場合が多い。一方、雨域ないし、そのレーダーエコーは上層風と高い相関で移動することが知られているので、上層風を実時間で測定できれば、その時の降水エコーを測定風を用いて外挿し、将来の雨域を予測する方法が効果的であると考えられる。立平(1976)らは対流圏中層の風を与えて、この方法の事後検証を試み、比較的良好な結果を得ている。

上で述べた外挿法による降雨の短時間予測のための上層風の測定を実時間で実行する最も有力な手段として、ドップラーレーダーがある。ドップラーレーダーを用いた水平風の測定方法としては VAD (Velocity Azimuth Display) と呼ばれる方法が多く行なわれている(小平・立平, 1972; Battan, 1973)。一台のドップラーレーダー観測による水平風の解析としては、Boucher *et al.* (1965), Peace *et al.* (1969)らの研究がある。また、最近 Waldteufel and Corpin (1979)により一台のドップラーレーダーによる観測方法の新しい提案がなされた。これらの研究においては、レーダー観測時間内、レーダー観測域内の風の場合は一様ないし線型であると仮定して解析を行なっている。

このように一台のドップラーレーダーで上空の水平風が測定できると、この水平風で雨域を移動させることにより、雨域と雨量の迅速な短時間予測が可能になるであろう。

このような考えに基づき、国立防災科学技術センターでは、ファンビーム・ドップラーレ

ファンビーム・ドップラーレーダーを使用した水平風測定におけるスペクトルの考察—上田・八木—
レーダーによる水平風の観測を1979年9月10日から10月10日まで東京都三鷹市において行ない、速報(上田・八木, 1980)として報告した。降水目標の移動速度のレーダー方向の成分を測定し、2測定点での測定値から、風向・風速は測定時間内同一かつ一定であると仮定して、水平風を計算した。1時間程度の測定時間内に得られた数個の測定風は相互に近い値を示し、それらは館野における850 mbから500 mbまで50 mbごとの各気圧面での風のベクトル平均とも比較的良い一致を示した。このことから1台のドップラーレーダーを用いて上層風を簡単に測定できる可能性が確かめられた。さらに、観測をシステム化することにより、気象用ドップラーレーダーは上層風の実時間測定の有効な手段となりうると考えられた。

ドップラーレーダーによる上層風の実時間測定を実現するにあたっては種々検討しなければならない問題がある。とくに、ドップラースペクトルの特徴を明らかにし、ドップラー速度を求める方法を検討しておくことは重要であると考えられる。本報告では、速報で報告したファンビーム・ドップラーレーダーによる観測で得られたドップラースペクトルについて、その特徴を明らかにし、水平風計算に使用するドップラー速度としてどのような値を用いるべきかについて検討する。

2. 解析方法

速報で報告したファンビーム・ドップラーレーダーによる水平風の観測では、延べ92測定点でドップラースペクトルを得た。そのうちの、グラウンドエコーの影響の大きい3地点を除いた延べ89測定点を本報告の解析に使用した。

速報では、得られたドップラースペクトルから平均速度を求め、それをを用いて水平風を計算した。測定で得られた水平風は各ケースごとに相互に良く一致し、850 mbから500 mbまでの風のベクトル平均とも比較的良く一致した。それゆえ、水平風の計算には平均値を用いて良いであろうと考えられた。しかし、ドップラースペクトルを詳しくみると、分布の広がっているものや、最大のピークの他に副次的なピークのあるものも含まれている。このような場合には平均をとることの物理的な意味ははっきりしなくなり、また、どの電力レベル以上について平均をとるかによっても値が変わると考えられる。したがって、上空の一般風としての水平風を求めるためには平均値で良いであろうと考えられるが、ドップラースペクトルの特徴を調べるためには、平均値だけではなく、他の値を用いて比較する必要がある。

本報告では、ドップラースペクトルについての、全平均値、ピーク値及び-3 dB平均値を比較して、観測で得られたドップラースペクトルの特徴を明らかにする。上述の3つの値の定義と特徴は以下に示す通りである。

- (1)全平均値：ノイズレベル以上の電力についてのドップラー速度の平均値である。解析に用いたドップラースペクトルのノイズレベルは、ピークを0 dBとした場合、最大のノイズでも-10 dBを越えない程度であった。なお、速報で水平風の計算に用いた平均値

はこの全平均値である。

全平均値 \bar{V} は次式で計算される。

$$\bar{V} = \int_{-\infty}^{\infty} VS(V) dV / \int_{-\infty}^{\infty} S(V) dV$$

ここで $S(V) dV$ はレーダーに対する速度が $V \sim V + dV$ の間にある降水粒子からのノイズレベル以上の受信電力である。

全体の平均値は広い速度範囲(周波数範囲)を平均するので、分布が広がる場合や、副次的なピークが別にある場合などには平均の物理的意味は曖昧になる。

- (2)ピーク値：ドップラースペクトルの最大電力に対応する速度である。

ドップラー周波数(ドップラー速度)の分解能が高い場合には、ピーク近傍において対称ではなく、片寄った位置にピークが現われる可能性がある。

- (3)−3 dB 平均値：ドップラースペクトルの−3 dB 以上、すなわちピーク電力の $\frac{1}{2}$ 以上、について平均した速度である。計算式は−3dB 以上についてであること以外は全平均値と同じ式である。

ピーク値のように非対称で片寄った位置にピークが現われるという難点はないが、−3 dB 以下を無視して良いかどうかの問題点が残る。

上述の3種類の速度の他にドップラースペクトルから求められる典型的な速度として、実効速度、中央速度などがある。これらの速度のうち、ピーク値、実効値、中央値は直接測定可能であるが、平均値を直接測定する装置はまだ用いられていない(小平・立平, 1972)。本報告ではドップラースペクトルをデータレコーダーに記録し、各速度を後で計算する方法をとっているので、平均値も容易に求められる。なお、本報告の解析のためには実効値、中央値などはあまり必要ないので、全平均値、ピーク値及び−3 dB 平均値を用いて解析した。

3. ドップラースペクトルの特徴

3.1 ピーク値及び−3dB 平均値の全平均値との比較

まず、全平均値、−3dB 平均値及びピーク値にみられる差異について検討する。全平均値とピーク値との関係を図1に示し、全平均値と−3 dB 平均値との関係を図2に示した。図1、図2共に、点線上に黒丸が乗っていると、それぞれ全平均値とピーク値、全平均値と−3 dB 平均値が一致することを示す。全平均値とピーク値との相関係数は0.956であり、全平均値と−3 dB 平均値との相関係数は0.980であった。

図から明らかなように、ピーク値の全平均値からのずれは−3dB 平均値の全平均値からのずれより大きかった。ピーク値が全平均値からずれる原因の一つは、図3に示したように、ドップラースペクトルのピーク付近が対称的ではなく、片寄った位置に最大のピークを示す場合があるためであると考えられる。

一方、−3dB 平均値においても、全平均値からの差が大きなものがみられる。これらの例

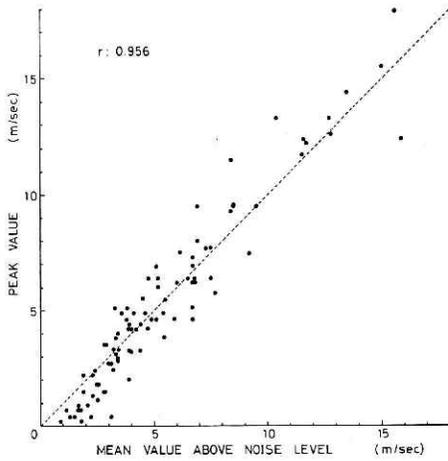


図 1 全平均値とピーク値の関係. r : 相関係数.

Fig. 1 Relation between mean value above noise level and peak value. r : correlation coefficient

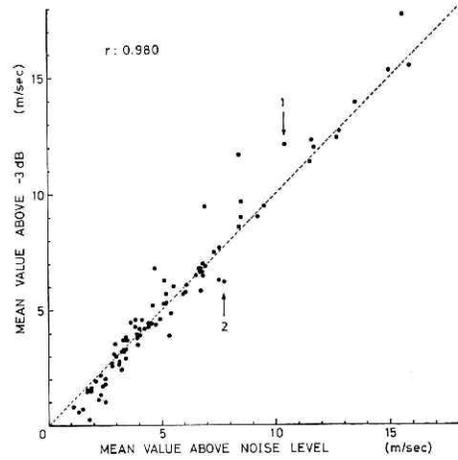


図 2 全平均値と-3dB平均値の関係. r : 相関係数.

Fig. 2 Relation between mean value above noise level and mean value above -3 dB level. r : correlation coefficient.

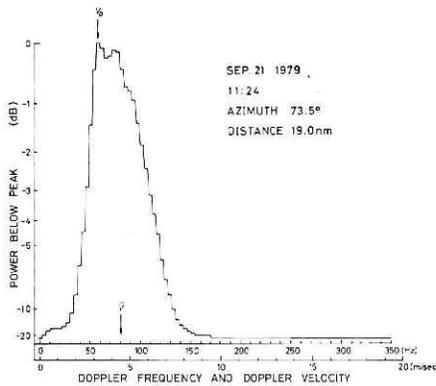


図 3 ピーク値(V_p)が、ピーク近傍で対称的でなく一方に片寄っているドップラースペクトルの例. \bar{V} : 全平均値.

Fig. 3 An example of discrepancy between peak value V_p and mean value above noise level \bar{V} . Doppler spectrum has a biased peak around the maximum.

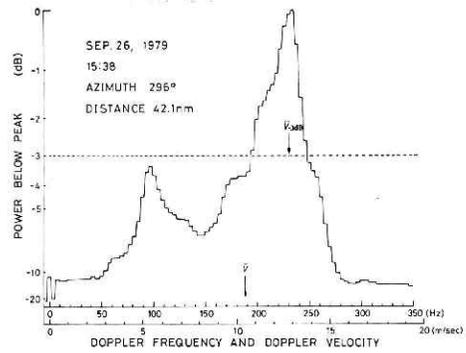


図 4 最大のピークの他にドップラー速度 5 m/s付近に副次的なピークのあるドップラースペクトルの例.

Fig. 4 An example of discrepancy between mean value above -3 dB level \bar{V}_{-3dB} and mean value above noise level \bar{V} . Doppler spectrum has a secondary peak at 5 m/sec of Doppler velocity. The secondary peak is not considered in the calculation of \bar{V}_{-3dB} .

として、図2の矢印1, 2に対応するドップラースペクトルをそれぞれ図4, 図5に示した。図4では最大のピークの他にドップラー速度5 m/sに近い位置に副次的なピークがみられる。この副次的なピークは -3dB 平均値にはきかないので、全平均値より -3dB 平均値の方が大きな値を示した。図5では最大のピークの他にドップラー速度11m/s付近に副次的なピークがあり、これによって全平均値より -3dB 平均値の方が小さな値を示した。図2において、点線から大きくずれているものは、上述のような副次的なピークをもっていたり、最大のピークの左右どちらか一方にだけ分布が広がっているようなスペクトルであった。しかし、大勢においては、分布形態は対称的であったため、大体点線に乗っている。

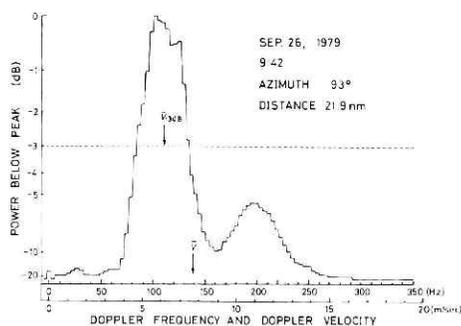


図5 最大のピークの他にドップラー速度11m/s付近に副次的なピークのあるドップラースペクトルの例。 \bar{V} : 全平均値。 $\bar{V}_{-3\text{dB}}$: -3dB 平均値。

Fig. 5 An example of discrepancy between mean value above -3dB level $\bar{V}_{-3\text{dB}}$ and mean value above noise level \bar{V} . Doppler spectrum has a secondary peak at 11 m/sec of Doppler velocity. The secondary peak is not considered in the calculation of $\bar{V}_{-3\text{dB}}$.

図1, 図2共に横軸の全平均値0 m/s付近では、ピーク値及び -3dB 平均値が全平均値より小さくなっている。これは、観測に使用した装置にオフセット*機能がなかったために、折返しが起こって0 m/s付近に対応する電力が大きくなり、ピーク値や -3dB 平均値にこの部分の影響が出るためであると考えられる。

3.2 全平均値、 -3dB 平均値、ピーク値を用いて計算した水平風にあらわれる差異

全平均値、 -3dB 平均値、ピーク値の差異がこれらを用いて計算した水平風の差異としてあらわれると考えられる。このことを検討するために、全平均値、 -3dB 平均値、ピーク値を用いて計算した水平風の例を図6の(a), (b), (c)に示した。この図は速報と同じく、2測定点での値を用いて水平風を計算したものであり、1979年9月29日15時33分から16時28分までの水平風の計算結果である速報のケース(9)に対応するものである。矢印の向きと長さで風向と風速を示し、1~6の数字で各測定点を示した。たとえば(a)の(1-6)と付記した矢印は、測定点1と測定点6での値から求めた水平風であり、ほぼ西南西の風であり風速17.5m/sであった。

* 周波数分析器はドップラースペクトルの正負を判別できないので、日標体積内に正負の速度を持った降水粒子が入り混っているような場合にはスペクトルの折返しが起こる。これをさけるために、ドップラースペクトルを Δf だけ正の側にずらして負周波数の部分をなくし、その後周波数分析器にかける手段をオフセットと言う。

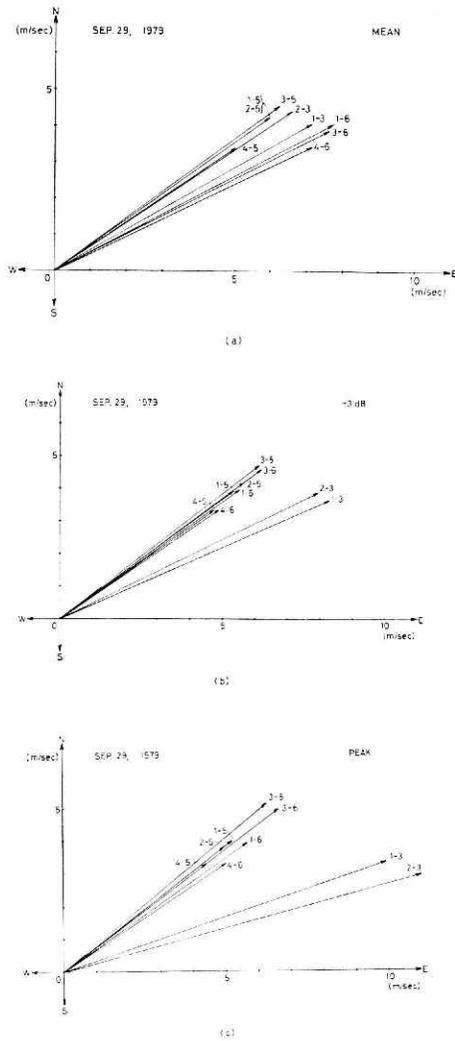


図 6 1979年9月29日15時33分から16時28分までの測定点1～6についての水平風の計算結果。速報(上田・八木, 1980)のケース(9)に対応する。(a)全平均値を用いた場合。(b)−3dB平均値を用いた場合。(c)ピーク値を用いた場合。

Fig. 6 Horizontal wind velocity calculated from the combination of two radial components of wind velocities. The figures from 1 to 6 show sampling points.

- (a) mean value above noise level is used.
- (b) mean value above −3 dB level is used.
- (c) peak value is used.

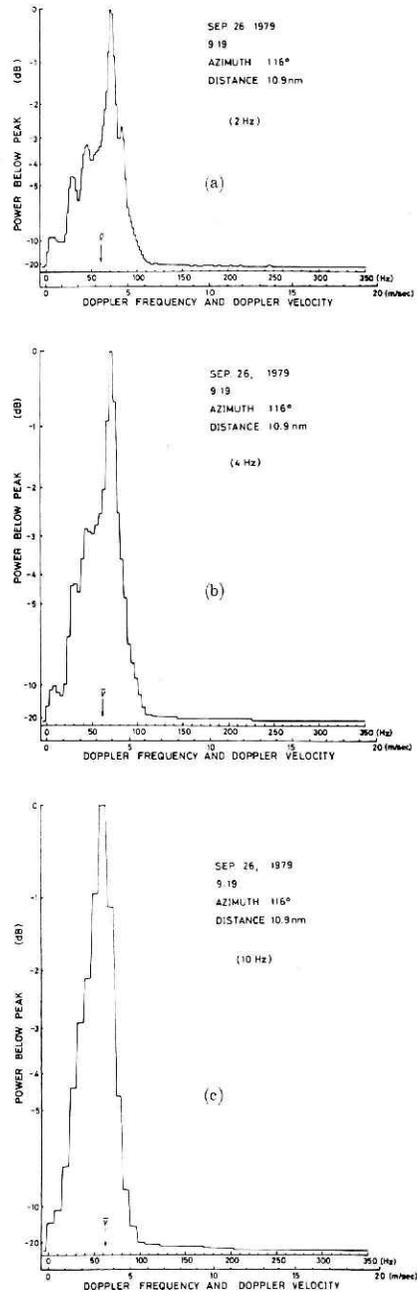


図 7 周波数分解能を変えた場合のドップラースペクトル。周波数分解能；(a) 2Hz, (b)4Hz, (c)10Hz.

Fig. 7 Doppler spectrum with different resolutions. Resolution: (a) 2 Hz, (b) 4 Hz, (c) 10 Hz.

図6の(a), (b), (c)を比較すると、ピーク値を用いて計算した場合が一番ばらつきが大きく、 -3dB 平均値を用いた場合はピーク値を用いた場合より相互の一致が良かった。結局、測定した水平風の一致は全平均値を用いて計算した場合が一番良かった。速報のケース(1)からケース(8)についてもほぼ同様の結果であった。

3.3 周波数分解能

前報ではドップラースペクトルの周波数分解能を 4Hz にして平均値を求めたが、水平風の計算等に支障はなかった。しかし、ドップラースペクトルの周波数分解能を変えると、得られるスペクトルの形が変わるために、とくにピーク値が変化すると考えられる。

図7の(a), (b), (c)に1979年9月26日9時19分にサンプリングを開始したデータについて、周波数分解能をそれぞれ 2Hz , 4Hz , 10Hz にして書かせたドップラースペクトルを示した。(a), (b), (c)は共にサンプリング開始時刻は共通であり、サンプリング所要時間はそれぞれ128秒, 64秒, 25.6秒であった。観測に使用したレーダーの送信周波数が 2720MHz であったので周波数分解能 $2, 4, 10\text{Hz}$ に対応する速度分解能はそれぞれ $0.11, 0.22, 0.55\text{m/s}$ である。

(a), (b), (c)の全平均値は三つとも 3.4m/s であり、ピーク値はそれぞれ $4.1, 4.0, 3.6\text{m/s}$ であった。分解能が 2Hz の場合はドップラースペクトルに細かな凹凸がみられ、最大のピークがその左右で非対称になるような片寄った位置に出やすい形になっている。

周波数分解能を変えた場合にサンプリングに要する時間が変化することを述べたが、同一測定点における1分程度のサンプリング時刻のずれでドップラースペクトルに差が出ないであろうか。図8の(a), (b)に約2分間のサンプリング時間の前後64秒ずつのサンプリングに対

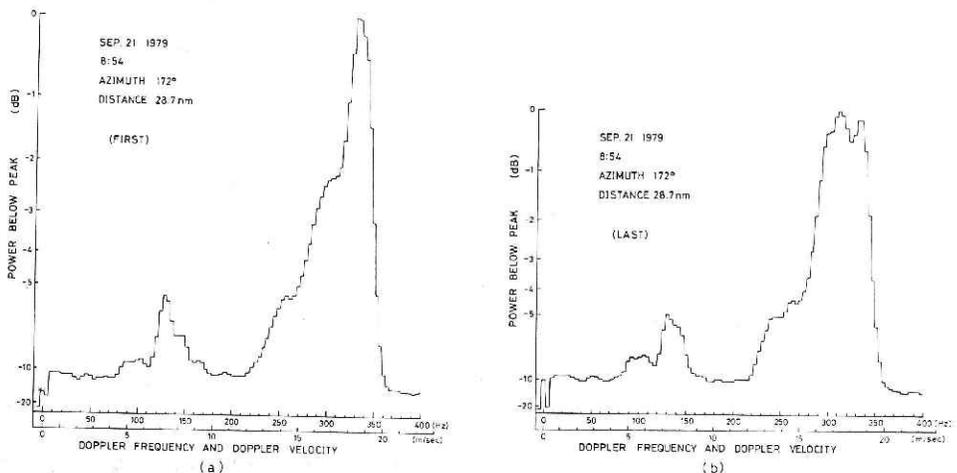


図8 1979年9月21日8時54分から約2分間に、同一測定点において、前後64秒間ずつのサンプリングで得られたドップラースペクトル。(a)前半。(b)後半。

Fig. 8 Doppler spectrum obtained by the first 64 seconds and the last 64 seconds during the total sampling time of about 2 minutes. The sampling was started at 0854 JST, on Sep. 21, 1979.

して得られたドップラースペクトルを示した。分布のパターンはほぼ同じであった。この他の3例についても同様のことを行なった結果、分布のパターンは前後でほとんど変化しなかった。

4. 討 論

3章で明らかになったドップラースペクトルの特徴から、最初に、水平風の計算に使用するドップラー速度としてどのような値を用いるべきかについて考察する。ドップラースペクトルのピーク値が全平均値からずれる場合があった。この原因は最大のピークがピーク近傍では一方に片寄っているために、ピーク値と全平均値に差異が出たためだと考えられる。ピーク値が全平均値からずれることもあるために、ピーク値を用いて計算した水平風は全平均値を用いて計算した水平風から大きくずれることになった。また、ピーク値を用いた場合に各ケースについて求められた水平風は図6の(C)にみられるように相互にかなりのばらつきがみられた。これらのことを考慮すると、ピーク値を水平風計算に用いるドップラー速度として採用するには難点があると考えられる。

-3dB 平均値はかなり全平均値に近かったが、各ケースの水平風の相互の一致は全平均値を用いた場合の方が-3dB 平均値を用いた場合より良かった。したがって、降水域全体の移動速度を取扱う場合には、水平風の計算に使用するドップラー速度としては全平均値を用いるのが良いと考えられる。

次に周波数分解能に注目すると、速報で行なった、2測定点での値を用いた水平風の計算のためには、測定風の精度から考えて、0.2m/s (4Hz) 程度の高い速度分解能(周波数分解能)が必要であったと考えられる。とくに全平均値が0 m/s に近くなる場合には、分解能が悪いと相対誤差が大きくなり、水平風計算に大きな誤差が出るおそれがある。しかし、おおよその値を得るためには、測定時間の節約を考えると0.5m/s (10Hz) 程度の速度分解能(周波数分解能)でピーク値を読むと良いと考えられる。実用化のためには0.1m/s~0.5m/s 程度の速度分解能を目的に応じて選択する必要があると考えられる。

適当な速度分解能のドップラースペクトルから計算した全平均値を水平風計算に用いるのが良いと考えられるが、平均値を計算するときノイズレベルをどこにおいたらよいかという問題がある。ファンビームを用いた水平風の観測では、分布が最大のピークの左右どちらか一方に広がりをもったり副次的なピークをもつ場合にはとくに問題になる。ノイズレベルを各ドップラースペクトルごとに変えて全平均値を計算したが、副次的なピークは全平均値の計算に寄与していた。ペンシルビームにすると小さなピークが出る心配はなくなるかもしれないが、実用化の際にはノイズレベルをどのようにとるかは事前に決定しておく必要がある。

ここで問題になったドップラースペクトルの広がりや副次的なピークが出ることの原因

は、グラウンドエコーの影響等により、ノイズレベルが高いことによる場合もあると考えられる。しかし、最大のピークの他に副次的なピークが出るのは、多くの場合ファンビームの特徴ではないかと考えられる。すなわち、上空に風のシアアがある場合に、風向・風速の異なる層にある降水粒子からのエコーが同時に得られるためではないだろうか。どの層の降水粒子がドップラースペクトルのどのピークに対応するのかが館野の高層データの解析だけでは判別がつかない。この対応づけはペンシルビームのドップラレーダーを用いて高度別の詳しい測定を行なえば可能になると思われる。

5. 結 語

豪雨の短時間予測手法の開発のための予備的研究として、1979年9月10日から10月10日まで東京都三鷹市においてファンビーム・ドップラレーダによる水平風の観測を行なった。本報告では速報(上田・八木, 1980)に引き続き、この観測で得られた延べ89測定点についてのドップラースペクトルについて、全平均値、ピーク値、 -3dB 平均値に着目してその特徴を調べ、次のことが明らかになった。

- (1) 全平均値、ピーク値、 -3dB 平均値はドップラースペクトルの分布の形によって異なった値をとる場合がみられた。それらの特徴及びそれらを用いて計算した水平風がどの程度一致するかどうかを考慮した結果、全平均値、すなわちノイズレベル以上の平均値が水平風の計算に用いるドップラ速度として最適であると結論された。
- (2) 速度分解能を検討した結果、精密な水平風を測定したい場合や、ごく短時間におおよその値を得たい場合などの目的に応じて、 $0.1\sim 0.5\text{m/s}$ 程度の速度分解能を選択する必要があると考えられた。
- (3) 観測で得られたドップラースペクトルの最大のピークの左右どちらか一方に分布が広がったり、副次的なピークの出る原因を明らかにするためには、ペンシルビームによる高度別の詳細な観測を行なえば可能となる。

速報及び本報告の解析結果から、豪雨の雨域及び雨量の短時間予測の為の上層風の実時間測定の実用化は、ドップラレーダシステムによる基礎的観測を積み重ねることにより可能となると考えられる。本格的な気象用ドップラレーダシステムの導入がまたれるところである。

謝 辞

観測データの整理にあたっては日本無線株式会社の鈴木勝彦氏に御尽力いただいた。また、同清水紀雄氏には有益な議論をしていただいた。記して感謝の意を表わしたい。

参 考 文 献

- 1) Battan, L. J. (1973): Radar Observation of the Atmosphere. The University of Chicago Press, Chicago, 324 PP. cf. P 148.

- 2) Boucher, R. J., R. Wexler, D. Atlas and R. M. Lhermitte (1965): Mesoscale wind structure revealed by Doppler radar. *J. Applied Meteorology*, **4**, 590-597.
- 3) 小平信彦・立平良三 (1972): 気象ドップラーレーダー, 気象研究ノート**112**号, 129-171.
- 4) Peace, R. L., Jr., R. A. Brown and H. G. Camnity (1969): Horizontal motion field observations with a single Doppler radar. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1096-1103.
- 5) 立平良三 (1976): レーダーエコーのデジタル化. 天気, **23**, 69-74.
- 6) 上田 博・八木鶴平 (1980): ファンビーム・ドップラーレーダーによる水平風の測定. 国立防災科学技術センター研究速報. 第**42**号, 24pp.
- 7) Waldteufel, P. and H. Corbin (1979): On the analysis of single-Doppler radar data. *J. Applied Meteor.* **18**, 532-542.

(1980年5月31日 原稿受理)