

UHFレーダーを用いた巻雲の観測

小林 隆久、福田 正人、永井智広
足立アホロ、浅野正二

気象研究所 茨城県つくば市

要旨

JACCS研究計画の一環として、気象研究所では400MHz UHFレーダーを用いた巻雲の観測を1996年から行っている。UHFレーダーは、元々は風向風速鉛直分布を測定する装置だが、巻雲が存在する場合、巻雲粒子からの散乱信号強度またその落下速度も測定できる。長い波長の電波を用いているため雲粒による減衰も小さく、巻雲の鉛直構造の観測に適している。これまでライダーやゾンデ等との同時観測による巻雲の検出手法の検証、また巻雲微物理量の抽出を行ってきた。これらの観測結果について報告する。

1. 序

地球温暖化において最も不確かな問題の1つは巻雲の果たす役割である。それは、巻雲が、雲頂高度、光学的厚さ、粒径等の特性により heating/cooling の両方の効果を持つことによる。巻雲の観測手法には、可視/赤外センサー、ライダー、雲レーダーがあるが光学的に薄い/厚すぎると観測できない、機器の数が限られているなどの問題がある。最近、巻雲の観測に有効と言われて注目を浴びているものにUHFレーダーがある(Ralph,1995,Kobayashi et al.,1998)。これは404MHz ウィンドプロファイラーと呼ばれているもので、元々は大気の屈折率変動部分からの散乱、ブラッグ散乱を利用して風を測定する装置である。しかし、雨などの粒子により散乱された信号、レーリー散乱も受信することができる。巻雲から散乱された信号も条件により受信可能なためその観測手法の研究が始められている。このウィンドプロファイラーはすでに世界各国50箇所以上での観測が行われており、プロファイラーによる巻雲観測手法が確立すれば巻雲の知識が飛躍的に増加すると期待されている。ここではウィンドプロファイラーによる巻雲検出手法並びに気象研究所ウィンドプロファイラーとライダーにより巻雲を観測した結果について報告する。

2. 巻雲からの散乱信号

404MHz ウィンドプロファイラーは、約75cm と長い波長(λ)の電波を用いている。一方、巻雲氷晶は1mm以下と波長に比べ非常に小さいため、巻雲からの散乱信号も非常に微弱なものとなる。この微弱な信号がプロファイラーにより受信できるか否かの可能性を調べる。ウィンドプロファイラーが受信する電力 P_r は、レーダー方程式を用いて計算することができる。

$$P_r = P_t C \lambda^2 \eta / r^2 \quad (1)$$

で表される。ここで P_t は送信電力、 C はレーダー一定数等を表すパラメータ、 η は

reflectivity を示す。r は対象領域とウィンドプロファイラーの距離を表す。ウィンドプロファイラーで通常受信しているブラッグ散乱の reflectivity は、

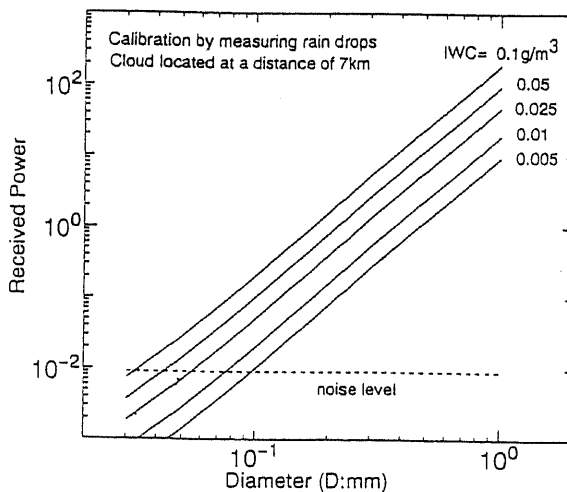
$$\eta = 0.38 C_n^2 \lambda^{-1/3} \quad (2)$$

と表される。C_n² は構造パラメータである。reflectivity は、大気条件にもよるが 10⁻¹⁹ から 10⁻¹⁴ (m⁻¹) 程度と言われている。一方、粒子によるレーリー散乱の reflectivity は

$$\eta = 284.6 \cdot 10^{-18} Z \lambda^{-4} \quad (3)$$

と表される。Z は reflectivity factor である。0.1mm の球形氷晶、氷水量(IWC)として 0.01g/m³ の巻雲の reflectivity は 10⁻¹⁷ 程度である。この値は上述した Bragg 散乱とほぼ等しく基本的にウィンドプロファイラーは巻雲の観測が可能なが推測できる。

気象研究所ウィンドプロファイラーにおける巻雲への感度を調べるために、降水によりウィンドプロファイラーの校正を行った。降雨時にプロファイラーで受信電力、鉛直速度(雨滴粒径)、また地上雨量計で降水量を同時測定する。粒径と降水量から計算した受信電力と観測した電力を比較することで校正できる。第1図は、校正結果で種々の氷水量の巻雲から散乱される電力を粒径の関数としてプロットしたもので、最小受信レベルと共に記してある。0.1mm の粒子では、0.005g/m³ の IWC で最低受信レベルとなることが分かる。典型的な巻雲の氷晶の大きさを 250 μm、また氷水量を 0.025g/m³ (Dowling and Radke, 1990) とすると気象研究所ウィンドプロファイラーは巻雲に対し十分な感度があると言える。

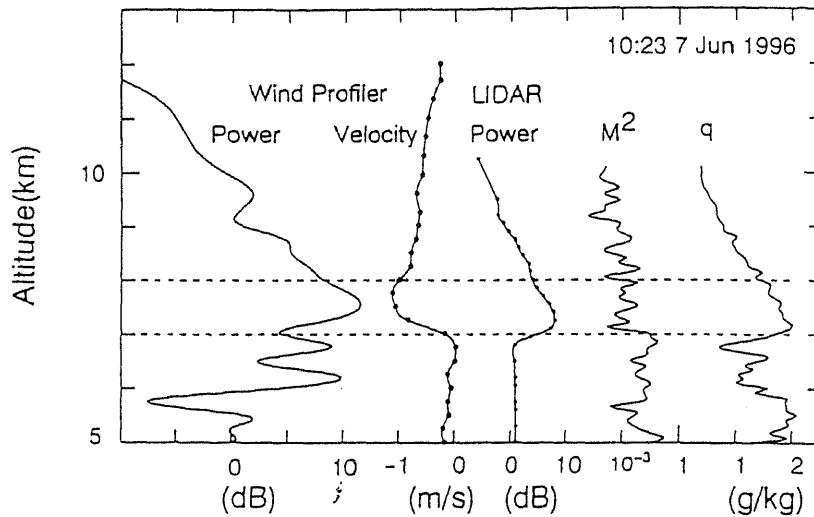


第1図 気象研究所ウィンドプロファイラーによる巻雲からの散乱信号

3. 巻雲検出方法

ウィンドプロファイラーは、上述したように晴天大気からのブラッグ散乱と粒子からのレーリー散乱信号を受信する。また両者による信号強度はほぼ同レベルであるため信号強度からブラッグ散乱とレーリー散乱を区別することができない。第2図は、1996年6月7日に行ったライダーとの同時観測結果で左からウィンドプロファイラー受信信号、

鉛直速度（負：下降流）、ライダー受信信号、ブラッグ散乱に比例すると言われるパラメータ M^2 (Tsuda et al. 1988)、そして比湿の鉛直プロファイルを示す。ライダー並びに比湿の観測結果は、巻雲が高度 7-8 km にかけて存在していることを示唆している。しかし、ウィンドプロファイラーは 7 km 以下にも大きな信号が表れている。この信号は、 M^2 のピークと良く対応しておりブラッグ散乱によるものと考えられる。2つの散乱を区別するのに利用できるのが鉛直速度である。巻雲中の氷晶は大きさ、形によるが通常数十 cm/s の早さで落下している。このためウィンドプロファイラーで測定した鉛直速度は、雲底で不連続となることが期待できる。実際に第 2 図でも 7 km を越えると鉛直速度が大きく変化していることが分かる。大気の鉛直速度は一般にあまり大きくないと仮定すると、適当な敷居値を鉛直速度に設定することでブラッグ散乱とレーリー散乱とを区別することができる。

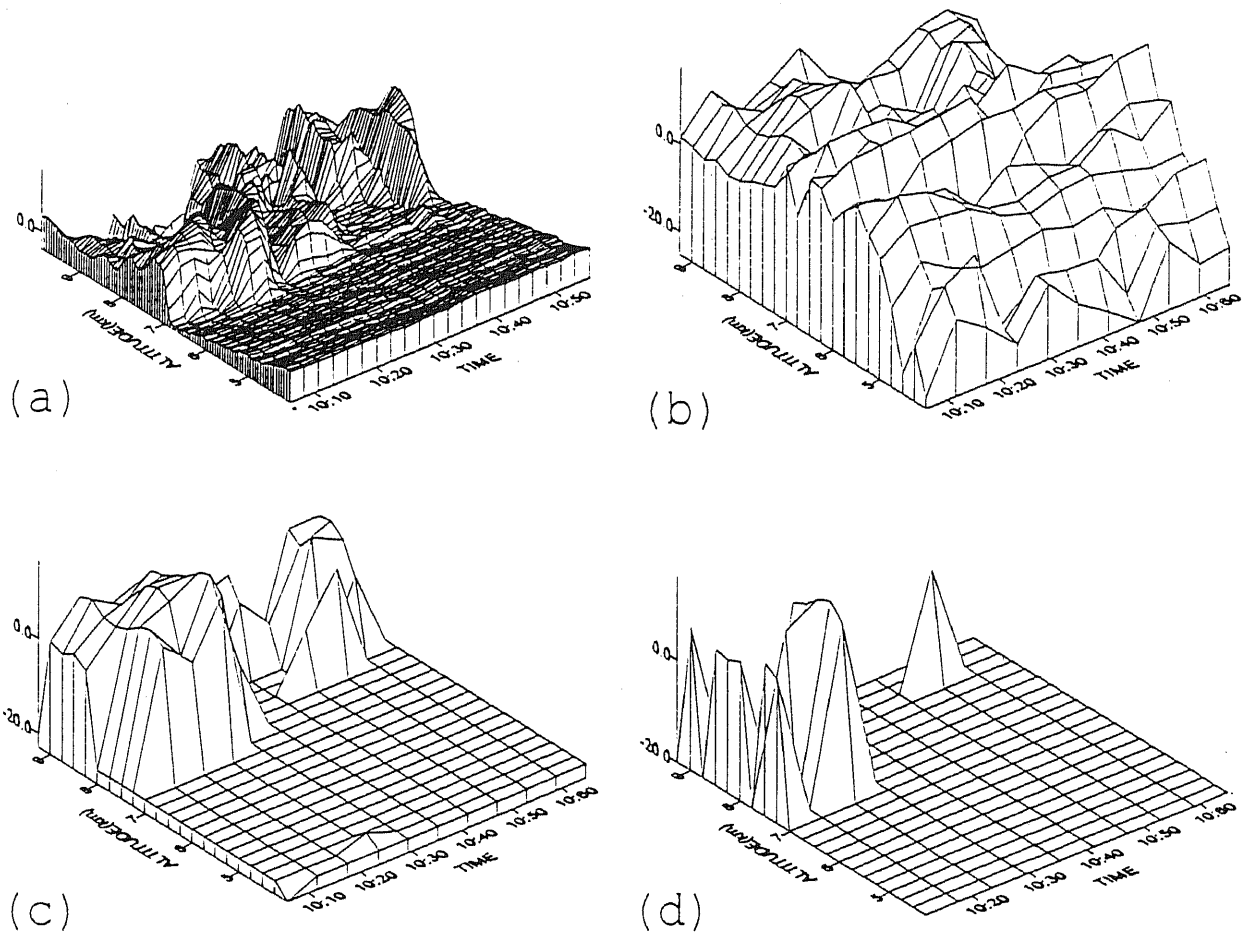


第 2 図 ウィンドプロファイラー、ライダーおよびゾンデによる観測結果。
左からウィンドプロファイラー受信信号、鉛直速度（負：下降流）、ライダー受信信号、ブラッグ散乱に比例すると言われるパラメータ M^2 、そして比湿の鉛直プロファイルを示す。

4. 観測結果

第 3 図は、1996 年 6 月 7 日に行ったライダーとの同時観測結果で、受信電力の時間-高度マップである。ライダー (Nd:Yag) による観測結果を示したのが (a) で、10:00 から 10:30 までは高度 7 km に、10:30 以降は 8 km 付近に雲底をもつ雲の存在を示している。しかし、プロファイラーでは Bragg および Rayleigh 散乱を受信するためほぼ全ての時間、全ての高度にエコーが観測されている (b)。この 2つの散乱エコーを鉛直速度のしきい値を用いて分類する。巻雲の氷晶は比較的大きいため落下速度も 0.3-1m/s と大きい。一方、大気流は小さいと仮定して 0.4m/s 以上の鉛直速度を持つエコーのみをプロットするとライダーによるものとほぼ一致したエコーとなる (c)。さらに 0.8m/s 以上の鉛直速度を持つエコーのみをプロットしたのが (d) で、この領域は大きな落下速度を持つ氷晶、すなわち大きなサイズの氷晶の存在を示している。最適なしきい値の設定は大気条件、氷晶の形状、

大きさに依存するが 0.3 -0.4 m/s が一般には適当であるとも言われている(Orr and Martner,1996)。

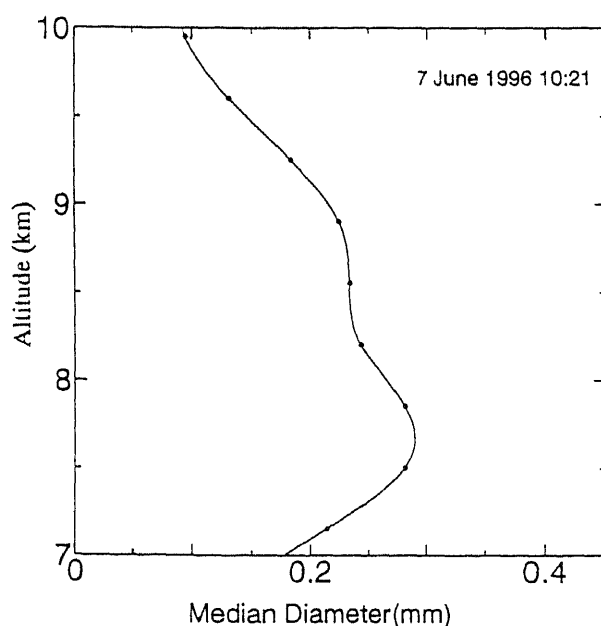


第3図 ライダーおよびウィンドプロファイラーによる受信信号の時間—高度マップ
 (a) ライダー受信信号、(b)ウィンドプロファイラー受信信号、(c)鉛直速度が
 0.4m/s以上のウィンドプロファイラー受信信号、(d)鉛直速度が0.8m/s以上
 のウィンドプロファイラー受信信号

鉛直速度はまた氷晶の大きさの推定にも利用できる。氷晶はその大きさ並びに形状に応じて数十 cm/s から 1m/s の速度で落下している。氷晶の形状が既知ならば、ウィンドプロファイラーで観測した鉛直速度から大きさが推定できる。幸い今回行われた JACCS の観測ではビデオゾンデを用いた測定も同時に実施された。このビデオゾンデによる観測では、column 形の氷晶が、対象としている巻雲中に多く観測された（村上, private communication）。この場合の氷晶サイズ(D)と落下速度(V)の関係は

$$V(D) = aD^b \quad (4)$$

と近似的に表される（Starr and Cox, 1985）。ここで a は定数、b はサイズにより変化するパラメータである。巻雲氷晶の粒径分布をガンマ分布と仮定し、式(4)を用いれば巻雲からのドップラースペクトルが計算できる。計算したドップラースペクトルとウィンドプロファイラーで観測したスペクトルのピーク値が合うようなガンマ分布のパラメータを求めれば巻雲の median diameter が推定できる。こうして推定した巻雲氷晶の最大サイズをプロットしたのが第 4 図である。



第 4 図 巻雲氷晶の大きさの鉛直分布

5. まとめ

404MHz ウィンドプロファイラーは 75cm と長い波長の電波を用いるにも関わらず巻雲時間空間分布の観測にも非常に有用なことが分かった。また、ドップラースペクトルから氷晶のサイズの推定も可能となる。ウィンドプロファイラーは、対流圏から下部成層圏にかけての風向風速鉛直プロファイルを連続観測できる装置としてすでに世界各国で運用されている。このネットワークで巻雲を観測することで、従来得られていなかった巻雲の実態把握に大きな貢献が期待できる。

参考文献

- Dowling D.R., and L.F.Radke,1990: A summary of the physical properties of cirrus clouds, *J.Appl.Meteorol.*,29,970-977.
- Kobayashi,T., A.Adachi, T.Nagai, and S.Asano,1998: Detection of cirrus clouds with UHF wind profiling radar, *J.Atmos.Oceanic Technol.* in press.
- Orr, B.W., and B.E.Martner, 1996: Detection of weakly precipitating winter clouds by a NOAA 404MHz wind profiler, *J.Atmos.Oceanic Technol.*,13,570-580.
- Ralph F.M., 1995: Using radar-measured radial vertical velocities to distinguish precipitation scattering from clear-air scattering, *J.Atmos. Oceanic Technol.*, 12,257-267.
- Tsuda,T.,P.T.May,T.Sato.,S.Kato,and S.Fukao, 1988:Simultaneous observations of reflection echoes and refractive index gradient in the troposphere and lower stratosphere, *Radio Sci.*, 23,655-665.
- Starr,D.C.,and S.T.Cox, 1985:Cirrus clouds. Part I:cirrus cloud model. *J. Atmos. Sci.*, 42,2663-2681.