

3. Lバンドレーダーによる境界層観測*

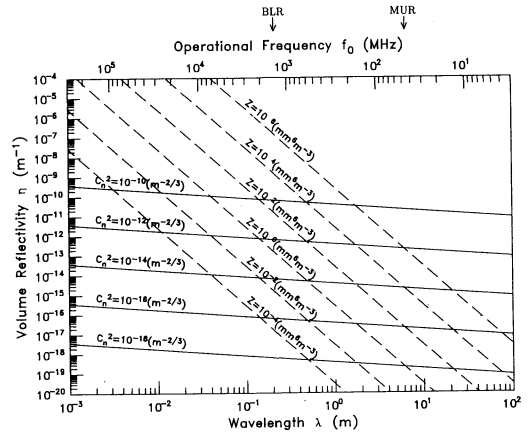
深尾 昌一郎**

1. はじめに

高感度パルスドップラーレーダーを用いて風速の高度変化を連続観測する技術はほぼ確立しているといつてよい。中でも京都大学超高層電波研究センター(RASC)のMUレーダーは高速ビーム走査等多くの機能を備えた最先端のレーダーである(Fukao *et al.*, 1985a, b)。この種のレーダーはまたウィンドプロファイラーとも呼ばれ一般に40~400 MHz帯の周波数が使われている。特に歴史的あるいは経済的理由で40~55 MHz帯が使われることが多い。この周波数帯のプロファイラーには400 MHz帯のプロファイラーに比していくつか利点がある。一つの重要な利点は大気散乱が降水粒子による散乱と同程度の感度になることである。このため、降雨時にも大気鉛直流を正確に推定し得る(Fukao *et al.*, 1985c)。また大気安定層の検出も可能で、これから例えば対流圏界面を時間的に連続に推定することも行われている。

しかしながらこれらのウィンドプロファイラーは大気境界層(地上~高度1.5 km位)を観測できないという重大な制約もある。これは強いグラウンドクラッターのため受信機が飽和してしまうことやアンテナによる内部反射が主たる原因である。また周波数が低いと帯域幅が大きくとれないためパルス幅を短く出来ず、従って高度分解能を上げることができないという問題もある。

近年、ウィンドプロファイラーの原理を使って大気境界層の運動を観測する小型の境界層レーダー(BLR)の開発が行われている。初めてBLRの開発に成功したのはNOAA(米国海洋大気庁)のEcklund *et al.* (1988)で周波数は915 MHzであった。RASCもLバンド(1350 MHz帯)で初めて同種レーダーを



第1図 レーダー反射能(η)の周波数(λ)依存性。

開発したのでこれを中心に紹介する。

2. BLR と周波数

BLRとしては、できるだけ簡便で移動も容易なシステムが志向されている。またできるだけ地表に近い高度(例えば100 m位)から観測できることが必要である。更に高度分解能を100 m程度にできること、通常的气象状況で高度2~3 km迄観測可能でなければならない。

BLRシステムの設計も一般のプロファイラーと同様である。第1図に大気乱流(構造定数を C_n^2 で表わす)と降水粒子(反射因子を Z で表わす)による散乱強度(レーダー反射能 η)のレーダー周波数 λ に対する依存性を示してある。大気境界層内で C_n^2 の変動は極めて大きいがおおざっぱに言って $10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ 程度、一方 Z は通常の場合 $10^2 \sim 10^4 \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ 程度である。MUレーダーのような50 MHz帯においては大気乱流と降水粒子による η は同程度であるが、BLRの1000 MHzを超える周波数帯では降水粒子の影響が卓越し、降雨時は降水粒子からの散乱エコーが受信されることになる。従ってプロファイラーは鉛直方向には降水粒子の降下速度(対地速度)を測定し鉛直流は測定

* Use of Wind Profilers for Boundary-Layer Studies.

** Shoichiro Fukao.

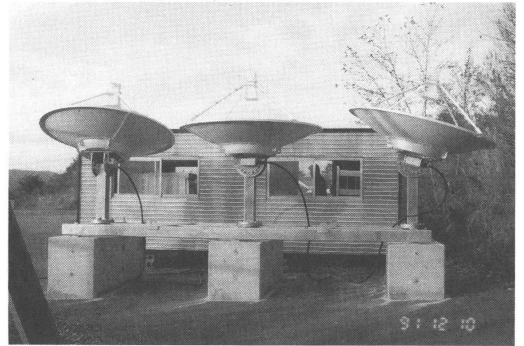
できないことになる。しかしながら降水粒子は降下時平均風により水平方向に移流させられるのでこれから水平風を推定することは可能である (Fukao *et al.*, 1985c)。

3. システム構成

BLR の構成は一般のウィンドプロファイラーと同じであり、送信機、受信機、アンテナ、信号処理機とレーダー制御機から構成される。アンテナは堅牢であることは勿論、軽量で可搬性に富むものでなければならない。また不要なグランドクラッターを抑えるためにはできるだけ背の低いものであることが望まれる。プロファイラーと同様 BLR の観測でもビームを3方向(以上)に向け、それぞれ視線方向速度を測定し、風速の一樣性を仮定して3成分を算出することが行われている。3方向のビームを作るためには一つのアンテナを機械的に3方向に走査する方法の他、アンテナ3面をそれぞれの方向に固定して送信を順次切り換えて行うという方法もある。NOAA の最新の BLR では電子的に走査可能なマイクロストリップアンテナが開発されている。送信機としてはピーク送信電力が100~1000 W 程度得られればよい。またパルス幅は0.5~2 μs であれば高度分解能75~300 m が達成可能である。またパルス繰り返し周波数は10 kHz 程度である。

一例として第2図に RASC の BLR の外観写真を示す。その主要諸元は第1表の通りである。この BLR は周波数 1357.5 MHz、ピーク送信電力 1 kW である。アンテナは3台の直径 2 m のパラボラアンテナから構成されており、それぞれ天頂方向・北に天頂角15°・東に天頂角15°の方向に向けられている。アンテナ方向は一方位方向のみ天頂角 $\pm 30^\circ$ の範囲内で手動により変更可能である。送信機は後方の小屋の内部に設置されており、それぞれのアンテナに対して半導体ハイパワーアンプ(計3台)を備え、スイッチで切り換えることで観測方向を高速に走査している。

一般にプロファイラーの感度を表わす指標の一つとして平均送信電力(P)とアンテナ開口面積(A)の積がある。レーダー反射能とレーダーシステム諸元とを考慮して観測可能な最高高度を推定することが出来る。PA積が一定であれば同一感度が実現できるから、送信機出力の大きなものが得られない際にはアンテナ開口面積を大きくしてPA積を稼ぐことが可能である。逆にアンテナ開口を小さくする場合にはビーム幅が広がり、ビームを傾けた際実質的に高度分解能が悪



第2図 地上用マイクロ波散乱計による積雪面観測

第1表 京都大学超高層電波研究センター(RASC)境界層レーダー主要諸元

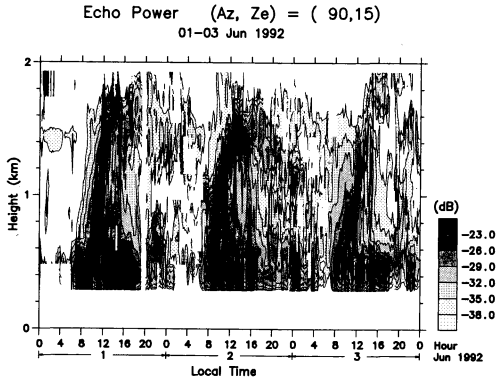
送受信周波数	1357.5 MHz
占有周波数帯域幅	4 MHz
送信電力	1 kW (尖頭値)
送受信ビーム幅	7.6°
距離分解能	最小 100 m
送信パルス幅	0.67, 1.0, 2.0 μs (切替)
パルス繰り返し周期	50, 100, 1000 μs (切替)
コヒーレント積分	1~16回
A/D変換	2 MHz (12 bit)
FFT点数	最大4096点

くなることに注意することが必要である。

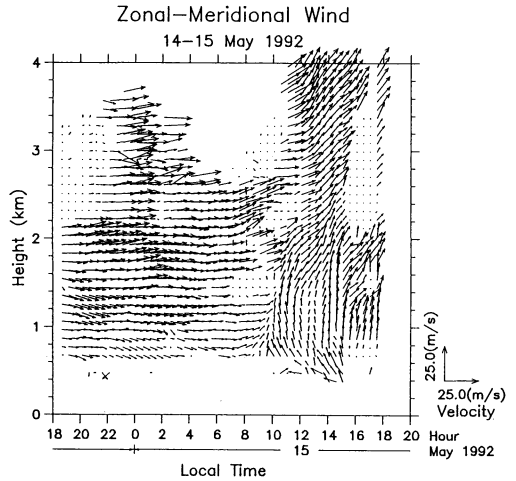
大気境界層内の C_n^2 の値はその上の高度域に比べてかなり大きいと考えられる。そのためPA積を2~3倍程度大きくしても大気境界層の上を観測することは容易ではない。例えば NOAA が太平洋のクリスマス島で運用している BLR の場合、PA~20 Wm^2 で高度2.5 km 迄 100 m の分解能でほぼ100%の時間帯データが得られている。一方、RASC の BLR の場合、PA~50 Wm^2 で同じく2 km 位であり出力を増しても高度は高くなっていない。但し、この場合は設置場所の気象状況の違いが大きいものと思われる。

4. 観測例

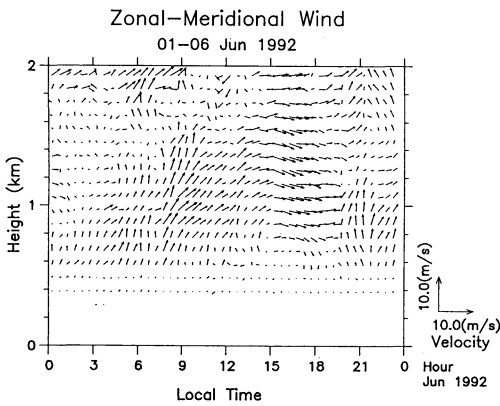
第3図は RASC の BLR により観測されたエコー強度の時間-高度変化である。強いエコー層の出現高度の日変化は、以前 Wangara 実験 (Yamada and Mellor, 1975) などで観測された強い乱れを含む混合層のそれとよく対応している。すなわち夜間は数100 m 以下の高度に存在する比較的弱い混合層が、8時頃から14時頃にかけて強い擾乱と共に高度1~2 km ま



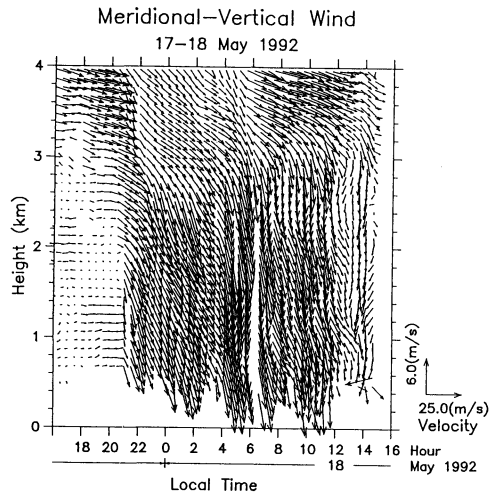
第 3 図 京都大学 RASC/BLR が観測したエコー強度の時間変化。



第 5 図 降雨時の水平風速。



第 4 図 京都大学 RASC/BLR が観測した水平風プロファイル。1992年6月第1週の平均値。



第 6 図 子午面内の風速ベクトル (降雨時)。21時以降の大きい下降流は降水粒子の降下速度を示す。

で上昇することを示すものと考えられる。第 4 図は平成 4 年 6 月の第 1 週に観測された水平風速の平均日変化である。日出の頃から南風あるいは南西風が卓越し始め、9 時頃に最も強くなっている。その後徐々に弱くなり強いエコー層が見えなくなる 15 時頃より西北西風へと変化している。

2 節でも触れたが BLR は降水粒子の存在に大変敏感である。降雨時には第 5 図に示すように観測可能高度は 4 km を超える高度にまで広がる。しばしば高度 7 km 近く迄観測されることがある。なお、これらの風速は MU レーダーを同時に用いた比較により正しい値が推定されていることが確認されている。

第 6 図に子午面内の風速ベクトルを示す。同図で 21 時頃から高度 3 km 付近で急速に下向き速度が増大しているのは降水粒子が氷晶から雨に変化するためであ

り、より高周波の気象レーダーで観測される融解層(ブライト・バンド)に対応する。BLR の散乱電力は確かにそこで増大しているのが観測されている。

5. その他の観測諸量

一般のウィンドプロファイラーと同様に BLR で風速以外にも様々な物理量が観測できる。例えば NOAA のグループのハワイ島における観測で散乱強度から貿易風逆転層が時間的に連続的にモニターできることが報告されている (Rogers *et al.*, 1991)。また対流に伴う

上昇流とこの逆転層の関係なども議論されている。更に BLR は降雨観測にも使われ出している。降水粒子の粒径は背景大気に対する落下速度の関数であることから、背景大気の鉛直流を例えば他の周波数の低いプロファイラーで測定し、Wakasugi *et al.*, (1986) の方法で粒径分布を高度の関数として推定する試みがなされている (Currier *et al.*, 1992)。降水粒子の落下速度を背景風の鉛直流と同時に調べるにより雲物理に関しても新しい知見が得られる可能性がある。また層状性降雨に伴う融解層や融解・蒸発の鉛直構造をモニターできることから湿潤大気における非断熱冷却率の推定も可能になると思われる。また最近では音波源を付設し、RASS (Radio Acoustic Sounding System) の技術を用いて温度プロファイルを同時に測定することにより熱フラックスの推定も可能となっている (Angevine *et al.*, 1992)。

6. 今後の動向

京都大学 RASC の BLR は Lバンドで初めて開発されたものである。今後更に高い周波数でも開発が進むであろう。また BLR は鉛直構造を詳細に調べられるが観測地点が限定されるという制約がある。数台の BLR と水平方向に広い領域をカバーできる気象レーダーとの同時運用ができれば大変面白いと思われる。

境界層レーダーは今後一層簡便なシステムが指向されると考えられる。NOAA のグループは既に長期間の無人運転を実現している。また船舶搭載用の境界層レーダーの開発も進んでいる (Carter *et al.*, 1992)。更にこれらを多数展開し、データを人工衛星等で自動的に収集するシステムも実現しており、我国でも同様の努力がなされるべきであろう。

参考文献

- Angevine, W. M., W. L. Ecklund, D. A. Carter, K. S. Gage and K. P. Moran, 1992: Improved Radio-Acoustic Sounding Techniques, Submitted to *J. Atmos. Oceanic Tech.*
- Carter, D. A., W. L. Ecklund, K. S. Gage, M. Spowart, H. L. Cole, E. F. Chamberlain, W. F. Dabberdt, and J. Wilson, 1992: First Test of a Ship-Board Wind Profiler, Submitted to *Bulletin of the AMS*.
- Currier, P. E., S. K. Avery, B. B. Balsley, K. S. Gage and W. L. Ecklund, 1992: Use of Two Wind Profilers for Precipitation Studies, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1017-1020.
- Ecklund, W. L., D. A. Carter, and B. B. Balsley, 1988: A UHF Wind Profiler for the Boundary Layer: Brief Description and Initial Results, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **5**, 432-441.
- , —————, —————, P. E. Currier, J. L. Green, B. L. Weber, and K. S. Gage, 1990: Field Tests of a Lower Tropospheric Wind Profiler, *Radio Sci.*, **25**, 899-906.
- Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihara, 1985a: The MU Radar with an Active Phased Array System, 1. Antenna and Power Amplifiers, *Radio Sci.*, **20**, 1155-1168.
- , T. Tsuda, T. Sato, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihara, 1985b: The MU Radar with an Active Phased Array System, 2. In-house Equipment, *Radio Sci.*, **20**, 1969-1176.
- , K. Wakasugi, T. Sato, S. Morimoto, T. Tsuda, I. Hirota, I. Kimura and S. Kato, 1985c: Direct Measurement of Air and Precipitation Particle Motion by Very High Frequency Doppler Radar, *Nature*, **316**, 712-714.
- 加藤進, 福山薫, 若杉耕一郎, 佐藤亨, 深尾昌一郎, 1982: 大型レーダーによる中層大気の観測, 気象研究ノート, **144**, 1-55.
- Rogers, R. R., C. A. Knight, J. D. Tuttle, W. L. Ecklund, D. A. Carter and S. A. Ethier, 1991: Radar Reflectivity of the Clear Air at Wavelengths of 5.5 and 33 cm, Submitted to *Radio Sci.*
- Wakasugi, K., A. Mizutani, M. Matsuo, S. Fukao and S. Kato, 1986: A Direct Method for Deriving Drop-Size Distribution and Vertical Air Velocities from VHF Doppler Radar Spectra, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **3**, 623-629.
- Yamada, T., and G. Mellor, 1975: A Simulation of the Wangara Atmospheric Boundary Layer Data, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 2309-2329.

コメント

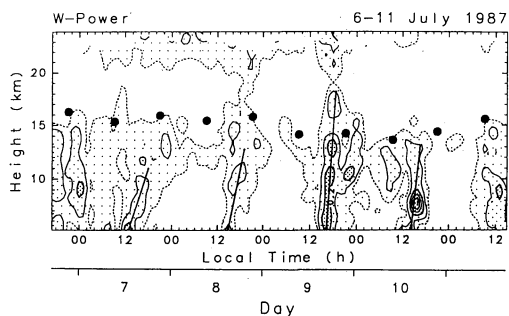
佐藤 薫 (京大理)

最近、京都大学超高層電波研究センターの運営する MU レーダーの風データを調べていたところ、夏の穏やかな日の午後にこれまで報告のない鉛直風擾乱がしばしば現れていることがわかった (Sato, 1992)。第 1 図に典型的な期間の鉛直風 w のパワー (w の 2 乗を時間高度方向にそれぞれカットオフ 2 km, 2 時間の低域通過フィルタで平滑化したもの) の時間高度断面図を

示す。地上気温が最大となる午後2時前後、擾乱がこの観測の最低高度である5 km位に現れ、対流圏界面まで達していることがわかる。これは、太陽加熱に起因する積雲対流によるものと考えられる。

積雲対流は、中緯度だけでなく、面積的に広くハドレー循環のエネルギー源でもある熱帯域においても、重要な熱輸送、運動量輸送媒体である。したがって、このような積雲対流のMSTレーダーによる高い時間高度分解能を持つ鉛直風も含んだ風の観測の役割は、今後ますます大きくなるだろうと予想される。

積雲対流の発生には、境界層でのサーマルやブリュームなどと熱対流によって空気塊が自由大気に持ち上げられる効果が必要と考えられている。ところが、市販のウィンドプロファイラーのような受信と送信を同じアンテナで行うモノスタティックなMSTレーダーは、PINダイオード特性により送受切替えに時間がかかり、例えば、MUレーダーでは境界層を含む高度2 km以下は測定不能である。紹介のあった境界層レーダーは高い周波数を用い、システムを小型化することで、400 mから5 km位までの境界層と自由大気のどちらも含む高度領域の観測が可能となった。これによって、サーマル・ブリューム等の渦運動や、山谷風等の局所循環に対する高分解能・高精度な新しいタイプの観測を行なうことができる。前述の積雲対流の



第1図 1987年7月6日～11日における、MUレーダーで観測されたwのパワー（詳細は本文を参照）の時間高度断面図。等値線間隔は $0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 点線は $0.05 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ の等値線。黒丸は潮岬のラジオゾンデ温度データから求めた対流圏界面高度 (Sato, 1992)。

発生メカニズムに関しても、新たなる知見が得られている。

参考文献

Sato, K., 1992: Vertical wind disturbances in the afternoon of mid-summer revealed by the MU radar. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1943-1946.

5012 (メソスケール擾乱；ドップラレーダー)

4. ドップラレーダーによるメソスケール擾乱の把握*

大野久雄**

1. はじめに

レーダーは、アンテナからビーム状に電波を発射し、目標物で反射された電波を受信して、その信号を処理することにより、目標物に関する情報を得る装置である。気象では降水粒子を目標物にすることが多い。こ

の場合、反射波の強さから降水の強さを、反射波の周波数変化からドップラ速度として降水粒子の動きをもとめることができる。通常の気象レーダーは前者の機能のみを持ち、ドップラレーダーは両者の機能を併せ持つ (第1図)。

降水粒子は風に流される。したがって、その動きから風に関する情報が得られ、これをとおして降水のある場所での擾乱の把握が可能になる。晴天下の大気乱流渦や昆虫などの小生物群も目標物になる。その場合反射波は晴天エコーとよばれ、やはり擾乱の把握に役

* Doppler radar utilization for revealing mesoscale disturbances.

** Hisao Ohno 気象研究所 気象衛星・観測システム研究部。