大気境界層観測レーダーによる風の観測 Remote Sensing of Wind Velocity by Boundary Layer Radar

林田英俊^{*1} 深尾昌一郎^{*2} 小林隆久^{*3} 荻沢 浩^{*3}
Hidetoshi HAYASHIDA Syoichiro FUKAO Takahisa KOBAYASHI Hiroshi NIRASAWA
又木義浩^{*1} 大竹和夫^{*1} 菊池雅之^{*1}
Yoshihiro MATAKI Kazuo OHTAKE Masayuki KIKUCHI

Recently, with an increase in the number of high-rise buildings, information about wind velocity at high altitudes has become more important. Boundary layer radar observations were carried out for about three months following completion of improvements in the observation system at the Meteorological Research Institute in Tsukuba. This paper shows the vertical profiles of wind velocity and a comparison with the results of wind profiler and high-rise tower observations. The results indicate that boundary layer radar can observe wind velocity up to an altitude of two to three kilometers and is of great use as a device for collecting wind data at high altitudes.

1. はじめに

建物の高層化に伴い、設計上支配的となる上空風の風速、乱れの強さなどに関する情報の重要性が高まってきた。近年、音波を利用したリモートセンシング（ドップラーソーダ）により、500m程度までの観測が可能となり建築の耐風設計の観点からの観測も実施されてきている^{1)~6)}。しかしながら、ここ数年の間に高さ600m以上の高層建築物の計画が次々と発表され、より上空の風に関する情報が必要となってきた。今回、つくばの気象研究所において上空2000m以上まで観測可能な大気境界層観測レーダーを用いた風観測を実施したのでその概要を報告する。本観測は、94年1月より開始したがその後システムの変更・調整等を繰り返してきた。本報では、システム変更完了後の95年12月から96年2月までの観測データについて報告する。

2. 機器の概要

大気境界層観測レーダーはLバンド（1.3GHz帯）のドップラーレーダーであり、大気の乱れを直接の散乱体として風速の測定を行う。システムの主要諸元を表-2.1に、機器の構成を図-2.1に示す。機器全体は空中線装置、送受信演算装置、高速演算装置および信号処理を行うパソコンから構成される。空中線装置は直径2mのパラボラアンテナ3台からなり、それぞれ天頂および天頂から15°北と東に傾けて設置されている（図-2.2）。各アンテナより順次、送信・受信を繰り返すことにより風速の3成分の鉛直分布を知ることができる。基本的な原理はドップラーソーダの音波に代えて電波を用いていると考えることができるが、電波の速度が非常に高速であるため高い高度まで短時間でデー

表-2.1 大気境界層観測レーダーの主要諸元

測風範囲	最高 80 m/s (水平方向) 最高 20 m/s (鉛直方向)
測風分解能	FFT ポイント数による
最低高度	約200m~300m (周辺状況による)
最高高度	約3,000m (気象条件による)
高度分解能	37.5 m
時間分解能	標準 約60秒
アンテナ	形式 直径2mパラボラアンテナ：3台 ビーム形状 ペンシルビーム ビーム幅 9°以下 利得 25 dB以上
周波数	1357.5 MHz
送信電力	1 kW
パルス幅	0.67 μs
パルス繰り返し周波数	20 kHz
受信システム雑音指数	3.5 dB以下

図-2.1 機器の構成

図-2.2 空中線装置外観図

^{*1} 錦竹中工務店 技術研究所

^{*2} 京都大学 超高層電波研究センター教授（工博）Radio Atmospheric Science Center, Kyoto University

^{*3} 気象研究所

Research & Development Institute, Takenaka Corporation
Meteorological Research Institute

タを得ることができ、また、騒音の大きな悪天候における測定も可能である。測定される風速は、電波ビーム幅とパルス長により囲まれた円筒形空間（高さ500mでは直径80m、長さ200m程度となる）の平均的な風速である（図-2.3）。標準的な測定モードでは37.5m 間隔で高度約2900m までの風速を1 分間隔で収録する。

3. 観測の概要

境界層レーダー本体はつくばの気象研究所構内の気象観測鉄塔の北側約200mに設置しており、周囲は障害物の少ない平坦地である。空中線装置およびその周囲には周辺の固定物からの電波の反射（クラッター）を防ぐため金属製のフェンスを設置している。

4. 観測結果

以下では、風速は水平成分のみを取り扱う。図-4.1に観測結果の一例として96年1月19日の17時から1月20日の5時および2月17日の21時から2月18日の9時における風速および風向の鉛直分布を、地上271mから

2879m までの73高度について、後述のwindプロファイラーによるデータとの比較のため、1時間平均値で示す。高度3000m 近くまでの風向・風速の連続的な変化が捉えられている。高さ400m 付近で明らかに不連続なデータがみられるが、現在のところはっきりした原因は分かっていない。観測記録より、高さによって風向が大きく異なっていることがわかり、例えば1月19日の18時では高さ1000m 以下で風向は東北東であるのに対し高さ2000m 以上ではほぼ反対の南西となっている。また2月17、18日の記録では1000m 以下は北東の風であるのに対し2000m 以上で

図-2.3 測定原理

図-4.1 風速および風向の鉛直分布の時間変化

図-4.2 風速の鉛直分布

図-4.3 境界層レーダーとウインドプロファイラーの風速および風向の比較

図-4.4 高さ1000m以下での風速の鉛直分布

は 2 時頃を境にそれまで南西の風であったものが、南東の風に変化している。図-4.2には、図-4.1の上、下段に示した 1 時間平均風速の最初の 4 時間の風速の鉛直分布を示す。17日21:00~22:00の記録のように、上空にゆくにつれ、風速の増加と減少を何度か繰り返すようなケースもみられる。図中には、気象研究所所有の400MHz帯を用いたウインドプロファイラーによる風速を併せて示しているが、本観測値と良く一致している。図-4.3には同一時刻におけるウインドプロファイラーとの風速、風向の比較結果を示す。ウインドプロファイラーが、高さ500mから16kmを測定対象としているため500mから2750mまで、250m毎の10高度について比較を行っている。結果より、風向に若干のばらつきがあるものの風速、風向とも高い相関がみられる。本レーダーでは、これらの相関や図-4.2の風速の鉛直分布より高さ500m程度より高い高度においては安定した測定値が得られている。次に観測可能な最低高度について検討を行う。本境界層レーダーの理論的な測定可能最低高度は、送信時間と送信から受信への切り替え時間により決定され200m~300mとなる。図-4.4に、高さ1000m以下での風速の鉛直分布を示す。高さ 271mから996mまでの本観測値と併せて、気象研究所構内の鉄塔観測による高さ25、50、100、150、200 および213mでの風速を示す。図中(A)(C)には 1 時間平均風速を(B)(D)には 10 分間平均風速を示す。評価時間の違いによらず風速は同様の分布傾向がみられ、いずれも本観測値と鉄塔観測データには連続性が認められる。図-4.4に示す 2月17日、18日の記録は代表的な2つの分布例であり、前者では風速は高さ300m程度までは概ね一定の値を示し、それより上空で高さとともに増加している。後者では、風速は地上から高さとともに増加しており(C)において高さ633mまでのデータを用いて(400m付近の明らかに不連続な風速は除く)べき指数を求めると $\alpha=0.48$ となる。図-4.5には、境界層レーダーの低高度の風速・風向データ(235mおよび271m)と気象観測鉄塔の高さ200mのデータの散布図を示す。比較には鉄塔観測データの入手できた 2月17日21時から18日 9時までの 1 分間平均のデータを用いている。風速の散布図の傾向は、概ね両高さとも一致しておりデータは、ほぼ 0 を通過し勾配が 1 より大きな回帰式上に分布している。ただし、高度235mでは回帰式より大きく外れるデータが増加し、相関係数も低下している。このデータのばらつきは、図-4.1に示した風速のベクトル図でみると、ランダムに発生しているのではなく、18日の 7 時以降に集中して見られ、気象条件の変化が影響していると考えられる。風向の散布図では、比較に用いたデータの風向が限られていることもあり相関係数が低く回帰式も高さによってばらつく結果と

図-4.5 境界層レーダーと気象観測鉄塔の風速および風向の比較

なっているが、概ね鉄塔での風向と対応している。観測データも少なく限られた検討ではあり、また、現状では相関係数が低いケースも見られるが、本境界層レーダーの観測可能な最低高度は、現在の状況では250m前後と考えられる。ただし、信頼性のある観測記録としてデータを利用するためには大きく外れたデータを除去するためのスクリーニング処理を実施する必要がある。

5. まとめ

境界層レーダーによる気象研究所での観測結果を用いて、風速、風向の鉛直分布の例を示し、ウインドプロファイラーによる観測および気象鉄塔観測との比較を行った。本境界層レーダーによる風観測は、気象条件によるもの高さ250m程度から2000m以上までの風の情報収集に有効な手段であると考えられる。ただし本報告で示した観測結果はいずれも降雪時のデータであり、大気の乾燥した晴天時のデータに関しては、現在のところデータの取得率が低下するケースが多い。今後、更に観測を継続し晴天時のデータ取得率の向上をはかるとともに、データの信頼性を向上するためのスクリーニング処理についても検討していきたい。

(参考文献)

- 1) 日比：音波を利用した風の遠隔測定、日本建築学会大会、1992年
- 2) 高倉他：ドップラー法による大気境界層の風の観測、ハザマ研究年報、1992年
- 3) 鄭他：音波を利用した風の実測—郊外地と市街地における風の観測—日本建築学会大会、1993年
- 4) 日比他：ドップラー法による台風時の風速鉛直分布の実測、日本建築学会大会、1994年
- 5) 天野他：ドップラー法による沖線における台風時の風観測（その1 ドップラー法と超音波風速計の比較）、日本建築学会大会、1995年
- 6) 山本他：ドップラー法による沖線における台風時の風観測（その2 平均風速と乱れの強さの鉛直分布）、日本建築学会大会、1995年
- 7) 花房他：気象観測鉄塔で観測された強風について、第6回風工学シンポジウム、1980年
- 8) 林田他：大気境界層観測レーダーによる風の観測、日本建築学会大会、1994年