

# 測風ライダーの観測モード別精度評価

星野 俊介\*

## Validation of Wind Vectors Obtained by Wind Profiler LIDAR

Shunsuke Hoshino

### 要旨

高層気象台では、GRUAN サイトへの登録を機に観測機器間の比較を目的として 2009 年 12 月に測風ライダーが整備され、下層大気風の観測を行っている。この測風ライダーは距離分解能を 30m・75m・150m のいずれかに設定することにより、それぞれ最大観測範囲 600m・1500m・3000m の各モードで 3 次元の風ベクトルを観測できる。このうち、距離分解能 75m のモードについては、星野・岩渕(2013)により視線方向のドップラー速度から VAD 法により風ベクトルを算出し、水平風成分について独自の品質管理を行った結果について検証がなされている。本研究では、これまで評価が行われていなかった距離分解能 30m 及び 150m の各モードも対象とし、測風ライダーの水平風について精度検証を行った。ゾンデとの比較からは、距離分解能 30m・75m および 150m モードの高度 2000m 未満の層については BIAS は  $\pm 1\text{m/s}$  以内、RMSVD は  $2\text{m/s}$  以内、平均風向差については  $20^\circ$  以内の精度で水平風の観測ができることが確認された。また、中立成層時の風速の理論的な鉛直プロファイルを用いて風向風速計の設置高度における風速を推定し、実測値との比較を行ったところ、両者の整合性が高いことが確かめられ、測風ライダーで得られる境界層内の風速プロファイルの妥当性が確認できた。

### 1. はじめに

高層気象台では、1 日 2 回(00UTC 及び 12UTC)、天気予報や気候変動の監視のために必要なデータとして、GPS ゾンデ(明星電気製 RS11G, 若しくはヴァイサラ製 RS92-SGPJ, 以下総称して「ゾンデ」と呼ぶ)による高層気象観測を行っている。このゾンデ観測では 1 秒値若しくは 2 秒値データで約 5~12m と高い鉛直分解能によるデータが取得可能である一方で、時間分解能が 12 時間であることから、短い時間スケールの現象は捉えられないという問題があった。近年、気象要素の鉛直プロファイルデータの取得にあたっては、従来のゾンデによる直接観測に加え、リモートセンシング観測データの利用が進んでいる。気象庁の展開しているウインドプロファイラ網(WINDAS: WIND profiler Data Acquisition System)(観測部観測課高層気象観測室: 2003)はその一例である。高層気象台においても、2009 年 9 月に全球気候監視システム(GCOS: Global

表 1 測風ライダーの主な仕様

レーザー光波長	1.5~1.6 $\mu\text{m}$		
距離分解能	30 m	75 m	150 m
レンジビン数	20		
最大観測範囲	600 m	1500 m	3000 m
送信パルス幅	200 ns	500 ns	1000 ns
変復調方式	パルス変調方式		
観測モード	コニカルスキャン (仰角 79.84 deg)		
走査角速度	1~20 deg/s ( <b>5 deg/s</b> )		
送信繰り返し周波数	4 kHz		
パルス積分回数	1000~16000 回 ( <b>4000 回</b> )		
出力データ	スペクトルデータ		
(メーカー提供観測プログラムによる)	視線方向データ(ドップラー速度, ドップラー速度幅, S/N 比) 3 次元風データ		

(太字は運用上の設定値)

\*高層気象台 観測第二課

Climate Observation System)基準高層観測網(GRUAN: GCOS Reference Upper Air Network)に登録されたことを機に、異種観測機器間の相互比較による品質管理のために測風ライダー (LIDAR: Light Detection and Ranging; 三菱電機製 LR-09FIHS) が整備され、下層大気風の風について連続観測を行うことが可能となった。なお、星野・岩渕(2013)では「可搬型ドップラーライダー」と呼称していたが、風の鉛直プロファイルを取得するという目的を反映して2013年12月以降この「測風ライダー(Wind Profiler LIDAR)」という名称を用いている。気象庁でのドップラーライダーの利用実績としては、空港気象ドップラーライダー(LIDAR)による、主に低仰角で広い水平範囲のスキャンデータから算出した低層ウィンドシアの検出を行い、航空機の安全運航に役立てている例がある(山本:2009)。これに対し、測風ライダーは高仰角でのコンカルスキャンを行い、風の鉛直プロファイルを取得することを主な目的としている点異なる。

ライダーは発射したレーザー光の大気中のエアロゾルによる散乱光を受信し、その信号周波数成分をスペクトル解析することにより、エアロゾルの視線方向のドップラー速度成分を抽出する。エアロゾルとの距離は、レーザー光の発射から散乱光の受信までの往復時間から測定できる。そして、レーザー光を繰り返しパルス送信しながらスキャンすることにより、走査面の各視線方向(方位角)におけるドップラー速度を連続して取得し、そのデータに対してVAD(Velocity Azimuth Display)法(Browning and Wexler: 1968)を適用することにより風向・風速を計算する。測風ライダーの主な仕様は表1の通りである。走査角速度とパルス積分回数については運用上の設定値を太字で示す。また、光アンテナ装置の焦点位置については第1層を中心に散乱光をより多く受信できるように設定している(ただし、焦点位置の調整は手動でS/N比の高度分布を見ながら行っている)。

星野・岩渕(2013)ではメーカー提供プログラムではなく視線方向のドップラー速度からVAD法を用いて独自に3次元風ベクトルを算出し品質管理を行う手法を開発した。手法の概要はAppendix Aに示す。2010年1月～2011年12月(ただし2011年2月～5月を除く)の期間に距離分解能75mモードで取得した水平風ベクトルの10分値についてゾンデで得られた風ベクトルを基準値として検証を行った結果、全体でBIASが $-0.062\text{m/s}$ 、RMSVDが $1.276\text{m/s}$ 、 $\overline{\Delta\text{DIR}}$ が $13.214^\circ$ であり、岩渕(2012)において導入された、メーカー提供プ

表2 距離分解能ごとの比較データ数

距離分解能[m]	30	75	150
主な期間	2013.12 -2014.12	2009.12 -2012.05	2012.05 -2013.05
比較データ数	533	1333	575

ログラムにおけるVAD法による算出に用いたデータ数による品質管理法を適用した場合(BIAS:  $-0.667\text{m/s}$ 、RMSVD:  $2.368\text{m/s}$ 、 $\overline{\Delta\text{DIR}}$ :  $27.734^\circ$ )よりも改善したことを示した(各比較要素の説明は2.2節にて後述)。一方で10分値の取得率は全体で50.59%、高度約1100mでは27.00%と低くなったことが示された。

距離分解能30mモードについては最高高度は低いがより細かい分解能で観測できるため境界層内の微細構造を把握することが、一方距離分解能150mモードについては分解能は粗くなるもののより高い高度の風を観測できることがそれぞれ期待され、測風ライダーの利用可能性を広げるものであるが、実際の利用のためには特性を把握しておく必要がある。そこで本研究ではこれまで精度評価が行われていなかったこの2つのモードを含め各距離分解能モードでの観測に対して星野・岩渕(2013)の手法を適用した場合の精度について検証した。星野・岩渕(2013)ではゾンデとの比較のみであったが、本研究では距離分解能30mモードに限り風向風速計との比較も行った。

2節では検証に使用したデータと検証手法、3節ではその結果と考察について述べ、4節でまとめる。

## 2. データと手法

### 2.1 データ

2009年12月～2014年12月(ただし2011年2～5月、2013年6月～11月を除く)の期間において、距離分解能30m・75m・150mのそれぞれのモードでの観測データから求めた10分値の水平風ベクトルについて、ゾンデとの比較による精度検証を行った。なお、期間中はRS-11GとRS92-SGPJの2種類のゾンデが使用されているが、比較観測の結果、両者の風観測値の差は十分に小さい(古林:2015)ことから、本研究におけるゾンデの風については両者を区別しないこととする。各モードのゾンデとの比較事例数については表2に示す。

### 2.2 ゾンデデータに対する検証手法

測風ライダーの風ベクトルは「各層の平均的な風ベクトル」であると考えられることから、ゾンデデータ

については館野の 1 秒値(RS-11G)若しくは 2 秒値(RS92-SGPJ)から、測風ライダーの各層に対応する高度の風を算術平均して求めた。

比較した要素は星野・岩淵(2013)同様、衛星画像から算出された大気追跡風の精度評価手法にならい、風速バイアス(BIAS)、ベクトル差の平均二乗値(RMSVD; CGMS 2003)及び風向差の平均( $\overline{\Delta\text{DIR}}$ ; Szantai *et al.* 2007)の 3 つであり、それぞれ以下の式 1, 式 5, 式 6 で定義される。

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{\text{ref},i}) \quad (\text{式 1})$$

$$VD_i = |\vec{V}_i - \vec{V}_{\text{ref},i}| \quad (\text{式 2})$$

$$\text{MVD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N VD_i \quad (\text{式 3})$$

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (VD_i - \text{MVD})^2} \quad (\text{式 4})$$

$$\text{RMSVD} = \sqrt{\text{MVD}^2 + \text{SD}^2} \quad (\text{式 5})$$

$$\overline{\Delta\text{DIR}} = \frac{180}{N\pi} \sum_{i=1}^N \cos^{-1} \left( \frac{\vec{V}_i \cdot \vec{V}_{\text{ref},i}}{V_i V_{\text{ref},i}} \right) \quad (\text{式 6})$$

ここで、 $\vec{V}_i$ は水平風ベクトル、 $\vec{V}_{\text{ref},i}$ は $\vec{V}_i$ に対応する比較対象の水平風ベクトル、 $V_i$ 及び $V_{\text{ref},i}$ はそれぞれの水平風速を表す。

これら水平風ベクトルの精度に加え、各層のデータの取得率(ライダーの有効データ数の全ゾンデデータ数に対する比率)についても調査した。

### 2.3 地上風速に対する検証手法

地上風の観測のため設置されている風向風速計(設置地上高 20.4m)はゾンデと異なり 10 分値の連続データが得られるが、その設置高度が測風ライダーの第 0 層の観測高度(海拔高度 51.16~80.69m, 地上高 26.36~55.89m)よりも低いため、測風ライダーの第 0 層の風とそのままでは比較できない。そこで、測風ライダーで観測された風速のプロファイルから、以下の手法により風向風速計の設置高度における風速  $V_{\text{WPL}}$  を推定し、実際の風向風速計による観測値  $V_{\text{Aerovane}}$  と比較することを試みた。

境界層内の地上高度  $z$  における水平風速  $u(z)$  は、中立成層の場合、対数則

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \log \left( \frac{z-d}{z_0} \right) \quad (\text{式 7})$$

に従うとされている。ここで  $u_*$  は摩擦速度、 $d$  はゼロ面変位高、 $z_0$  は粗度長、 $k$  はカルマン定数(=0.4)である。この関係を用いると、風のプロファイルから  $u_*$ ,  $d$ ,  $z_0$  が求めれば任意の地上高度の水平風速を算出することができる。そこで、測風ライダーの距離分解能 30m モードでの観測に対し、各 10 分値の第 0 層から第 4 層(中心の地上高度 41.1~159.2m)までのデータを最小二乗法を用いて式 7 にあてはめて  $u_*$ ,  $d$ ,  $z_0$  を求め、地上の風向風速計の高度(20.4m)における水平風速  $V_{\text{WPL}}$  を算出した。ただし、実際の環境が中立成層であるかどうかは不明であること、最小二乗法により各パラメータを決定できるだけの十分なデータがない場合があることなどから、必ずしも有効な  $d$ ,  $z_0$ ,  $V_{\text{WPL}}$  の値が得られるとは限らない。そのため、パラメータの算出が収束しない場合、及び算出されたパラメータが以下の条件を満たさない場合については除外した。

$$\begin{aligned} 0 \leq d \leq 20 \\ 0 \leq z_0 \leq 2.2 \\ W_{\text{WPL}} \geq 0 \end{aligned}$$

このうち  $z_0$  の条件については、桑形・近藤(1990)にならい、高層气象台から半径 2km 以内の土地の利用形態から推定した  $z_0$  ( $z_0$  の見積もりについては Appendix B 参照)が 0.47~0.73m 程度と見積もられることから、これを大きく(3 倍以上)超えるような  $z_0$  は対数則への誤ったフィッティングの結果である可能性があると考えたことによる。 $d$  については、仮にゼロ面変位が風向風速計の設置高度よりも大きい場合、対数項の計算が出来なくなるためである。この結果、2014 年 1 月から 12 月までの 30m モードで得られた 19,443 個の 10 分値のうち、 $V_{\text{WPL}}$  を計算できたのは 124 事例となった。

## 3. 検証結果と考察

### 3.1 ゾンデデータに対する検証結果

各モードの BIAS, RMSVD,  $\overline{\Delta\text{DIR}}$  及び取得率を各層ごとにプロットしたものがそれぞれ図 1, 図 2, 図 3, 図 4 である。黒線は距離分解能 30m, 青線は 75m, 赤線は 150m の各モードを示す。また、全層・第 1・第 7・第 13 層の各パラメータを表 3 に示す。

距離分解能 75m モードと 150m モードについては、高度約 700m 以下の BIAS については 75m モードのほうが小さい結果になっているが、高度約 1500m 以下のデータについては全体として BIAS, RMSVD,  $\overline{\Delta\text{DIR}}$  と同じ高度においてはほぼ同様の傾向を示していることがわかる。150m モードにおける高度 1500m 以上の

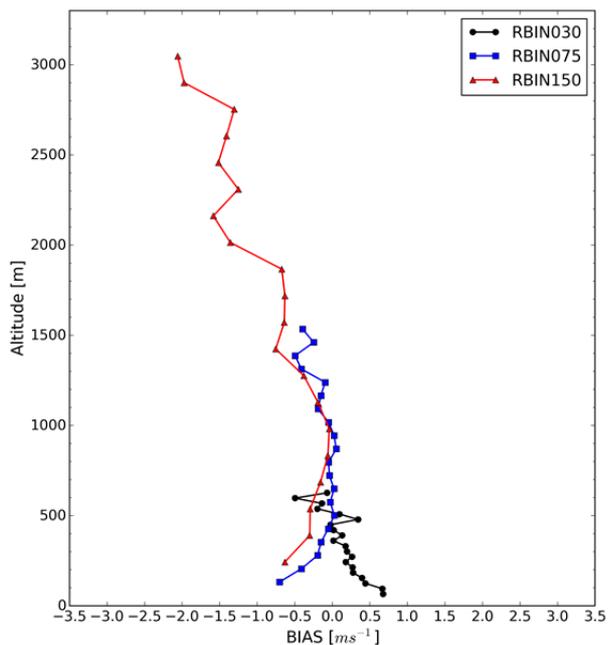


図 1 測風ライダーの各モードのゾンデに対する BIAS の高度分布. (黒丸)距離分解能 30m, (青四角)75m, (赤三角)150m. 各層の中心海拔高度にプロットしている.

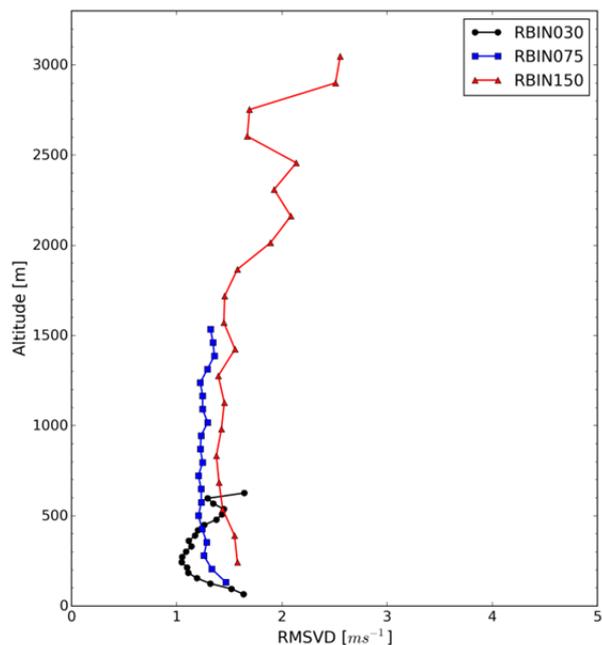


図 2 測風ライダーの各モードのゾンデに対する RMSVD の高度分布. 凡例は図 1 に同じ.

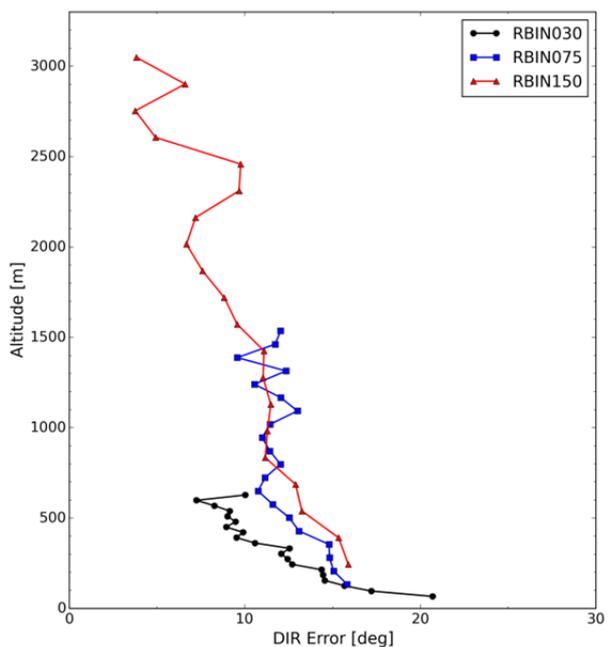


図 3 測風ライダーの各モードのゾンデに対する  $\overline{\Delta DIR}$  の高度分布. 凡例は図 1 に同じ.

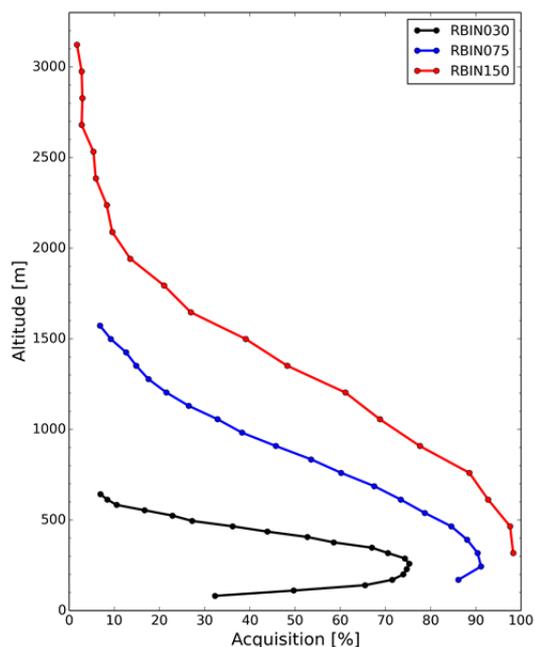


図 4 測風ライダーの各モードの取得率の高度分布. 凡例は図 1 に同じ.

層(第 12 層以上)の BIAS は高度とともに負バイアスが強まり RMSVD も増大していく傾向が見られる.  $\overline{\Delta DIR}$  は  $10^\circ$  以内で下層よりも小さいことから RMSVD の増

大はほぼ BIAS の増大に起因するものと考えられる. これについては, 高度とともに測風ライダーとゾンデの水平位置のずれが大きくなっていくことも関係してい

表 3 各距離分解能モードの全層・第 1 層・第 7 層・第 13 層の精度と取得率

層	分解能	高度 [m]	BIAS [m/s]	RMSVD [m/s]	$\overline{\Delta DIR}$ [deg]	取得率 [%]
全	30 m		0.24	1.21	12.80	46.93
	75 m		-0.16	1.27	12.97	49.98
	150 m		-0.39	1.50	12.38	38.64
1	30 m	80.69 – 110.22	0.67	1.52	17.21	49.72
	75 m	169.28 – 243.10	-0.41	1.33	15.06	91.15
	150 m	316.92 – 464.57	-0.30	1.55	15.34	97.57
7	30 m	257.86 – 287.39	0.26	1.05	12.43	74.30
	75 m	612.22 – 686.04	0.02	1.23	10.75	67.52
	150 m	1202.81 – 1350.46	-0.38	1.40	11.04	48.26
13	30 m	435.04 – 464.57	-0.03	1.26	8.95	36.21
	75 m	1055.16 – 1128.99	-0.19	1.25	13.00	26.48
	150 m	2088.70 – 2236.35	-1.59	2.09	7.19	8.33

ると考えられるが、その場合でも過大・過小評価のいずれの事例も発生すると想定され、位置のずれだけではこの層を境として負バイアスが增大することを説明できない。第 13・15・17・19 層の各層についてゾンデと測風ライダーそれぞれで観測された風速の散布図をとったものが図 5 であるが、風速の過大評価事例(図中灰線より上側)はごくわずかしかない。また、図 5 ではいずれの層についても「ゾンデの風速が小さい場合は誤差が小さいがゾンデの風速が大きくなると誤差

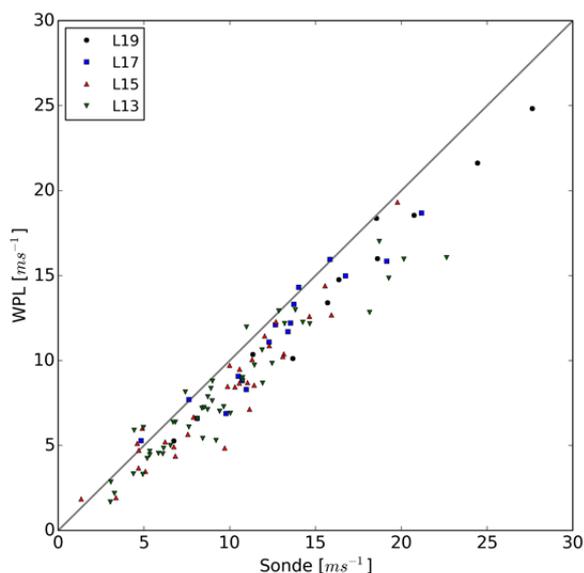


図 5 第 13(緑)・15(赤)・17(青)・19(黒)の各層におけるゾンデ(横軸)と測風ライダー(縦軸)の風速の散布図。灰線は両者が一致する線を示す。

が大きくなる」といった誤差の風速依存性は見られない。すなわち「測風ライダーの風速が頭打ちになることによってゾンデの風速が一定以上のデータについて誤差が大きな負の値をとり、その結果全体として負バイアスとなる」という説明は難しいと考えられる。以上高高度の負バイアスの原因について考察してみたが、十分に説明できる理由は得られなかった。ただし、第 16 層以上については取得率が 3%未満であり有効なデータが 20 個未満となることから精度評価にはデータ数が不十分であるとも考えられる。これらのことから、第 16 層以上については今回得られた値は参考値としての扱いにとどめることとする。

一方、30m モードの BIAS は、大きさとしては全層とも 1.0m/s 以内に収まる一方、高度約 500m 以下の層において他の 2 つのモードには見られなかった正バイアス(すなわち、ゾンデの風に対する過大評価)傾向が見られた。また、 $\overline{\Delta DIR}$ については第 0 層では 20° に達するなど、他のモードとは異なる特徴が見受けられる。これに関しては、放球直後(ゾンデの上昇速度を 6m/s と仮定すると、第 0 層を通過するのは放球後約 5~9 秒の間になる)のゾンデの風ベクトルの算出における振り子運動の影響の除去が不十分であることも関連している可能性も考えられる。ただ、いずれにせよ、BIAS, RMSVD,  $\overline{\Delta DIR}$ とも大きさとしては他のモードと大きな差はないものと考えられる。

取得率は、いずれのモードでも(1)高度約 200~300m の層で最も取得率が高くなっており、また、(2)高度約 2000m 以下については、同じ高度で見えた場合、距離分解能が低いほど取得率が高いという結果になった。こ

の結果については「焦点距離と S/N 比の関係」「実際のエーロゾルの高度分布」の2点から説明できるものと考えられる。まず、焦点距離と S/N 比の対応については、Kotake *et al.* (2013)で以下の関係があると示されている。

$$\text{SNR} \propto \frac{\Delta R \cdot D^2}{1 + \left(1 - \frac{L}{F}\right)^2 \left(\frac{\pi D^2}{4\lambda L}\right)^2} \quad (\text{式 8})$$

ここで  $\Delta R$ ,  $D$ ,  $L$ ,  $F$  はそれぞれ距離分解能, ビーム直径, ライダーからの距離, 焦点距離である。なお, 測風ライダーの場合,  $D$  は以下の式 9 により求める。

$$D = 0.05 \sqrt{1 + \frac{\lambda L}{0.000625\pi}} \quad (\text{式 9})$$

各距離分解能モード ( $\Delta R=30,75,150\text{m}$ ,  $F=1.5\Delta R$  とした) について式 8 の右辺を算出した結果の鉛直プロファイルを描画したものが図 6 である(ただし「S/N 比と比例する値」であることから横軸の数値は示していない)。図からは距離分解能が低い(レンジビンが大きい)モードほど S/N 比は大きくなる傾向にあること, 焦点距離で遠では距離とともに S/N 比が小さくなることを読み取れる。距離分解能 75・30m モードにおいても第 18 層以上は取得率が 10%未満となっており, これは

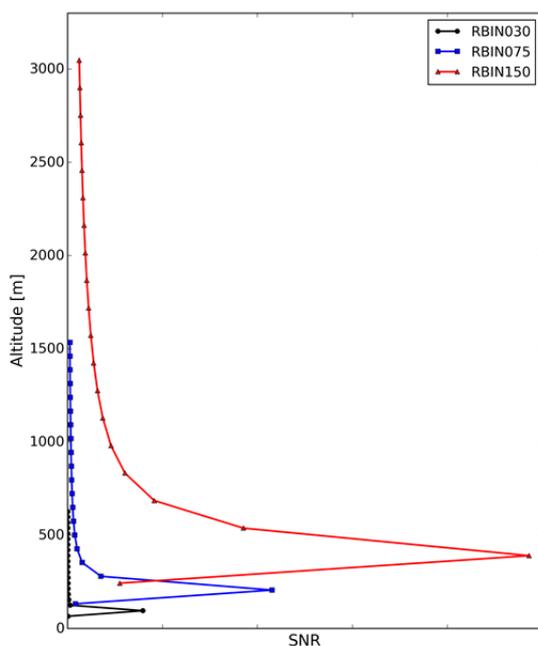


図 6 式 8 による理論的な高度と S/N 比の対応。凡例は図 1 に同じ。

S/N 比の低下により利用可能なデータ数が少なくなったことに起因すると考えられる。(2)については上記の結果距離分解能が低いモードでは S/N 比が大きなデータが増加し, 利用可能なデータが増えたことによるものと考えられる。しかしこの焦点距離と S/N 比の関係からだけでは, 距離分解能 30m モードにおいて第 1 層の取得率が約 50%にとどまっておき第 7 層の約 74%よりも低いという点について説明できない。このことから, (1)については館野上空の大気下層のエーロゾルの鉛直分布が S/N 比の大小として反映された影響を受けたものと推測される。いずれのモードにおいてもほぼ同じ高度で取得率が最大となっているということは, 高度 200~300m 付近にエーロゾルが最も多く存在することを示唆している。なお, 高度 2000m を超える層で取得率が大きく低下するのは, 図 6 で示した焦点距離で遠で高度とともに S/N 比が低下する傾向に加え, 境界層より上層の自由大気となるため, エーロゾル濃度が低下して信号として検出可能な強度の散乱光が得られなくなることに起因すると考えられる。これらの結果は, 主な観測対象とする高度が決まっている場

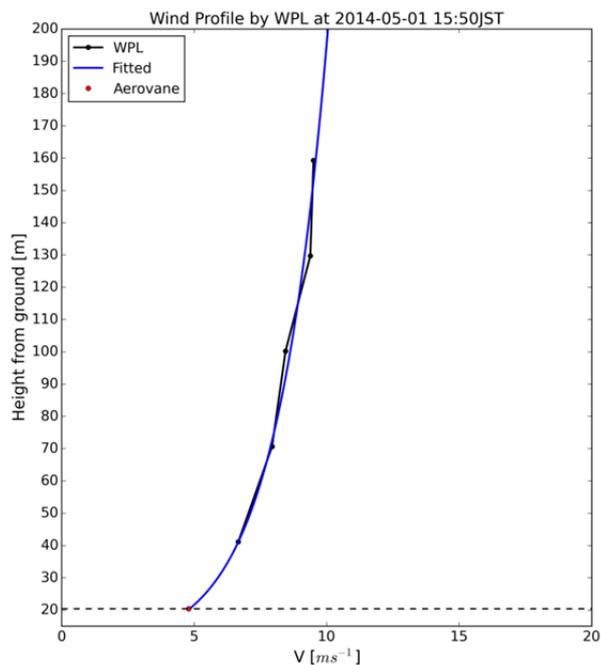


図 7 2014 年 5 月 1 日 1550JST の風速プロファイル。(黒)測風ライダーの観測結果, (青)対数則へのあてはめの結果, (点線)風向風速計の高度, (赤)風向風速計の観測結果。このとき,  $u_*=0.778\text{m/s}$ ,  $d=7.21\text{m/s}$ ,  $z_0=1.10\text{m}$ ,  $V_{\text{WPL}}=4.83\text{m/s}$ ,  $V_{\text{Aerovane}}=4.8\text{m/s}$  であった。

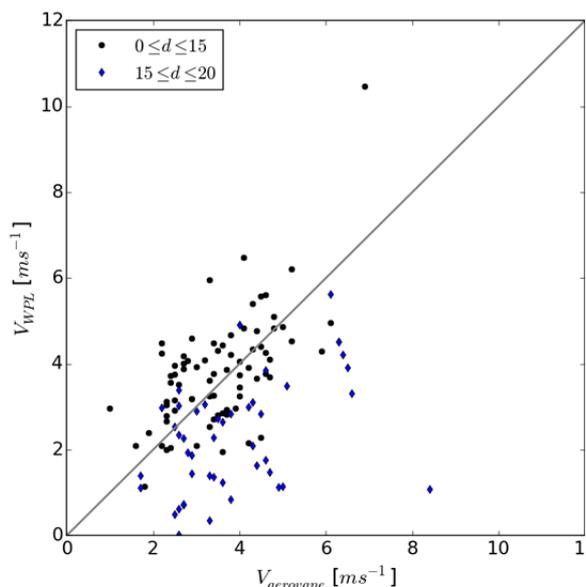


図 8  $V_{Aerovane}$ (横軸)と  $V_{WPL}$ (縦軸)の散布図。(黒丸) $0 \leq d \leq 15$ , (青菱形) $15 < d \leq 20$  のデータ。

合のモード選択及び焦点距離の設定の参考になると考えられる。

### 3.2 地上風速に対する検証結果

対数則へのフィッティングの例として、2014年5月1日1550JSTの事例を図7に示す。黒点が測風ライダーで観測された風速プロファイル、青線が対数則へのフィッティングの結果、点線が風向風速計の高度、赤点が風向風速計の観測結果である。高度は地上からの高度としている。この事例では、測風ライダーの風速プロファイルは対数則に非常によくあてはまっており、その結果計算された  $V_{WPL}(=4.83\text{m/s})$  も  $V_{Aerovane}(=4.8\text{m/s})$  とよく合っていた。このとき、計算されたパラメータは  $u_* = 0.78\text{m/s}$ ,  $d = 7.21\text{m}$ ,  $z_0 = 1.10\text{m}$  であった。

横軸に  $V_{Aerovane}$ , 縦軸に  $V_{WPL}$  をとった散布図が図8である。BIAS=-0.41m/s, RMSE=1.58m/s となった。差の大きな事例としては、 $V_{Aerovane} = 8.4\text{m/s}$  に対して  $V_{WPL} = 1.08\text{m/s}$  となったものもあった。その事例(2014年8月11日1240JST)におけるプロファイルとフィッティングを描画したものが図9になる。測風ライダーのプロファイルに対するフィッティングそのものは問題ないように見えるが、求められた  $d$  が 19.98m と風向風速計の高さに近く、風向風速計の高度付近で式7の対数項が0に近づくため計算上の風速が急速に弱ま

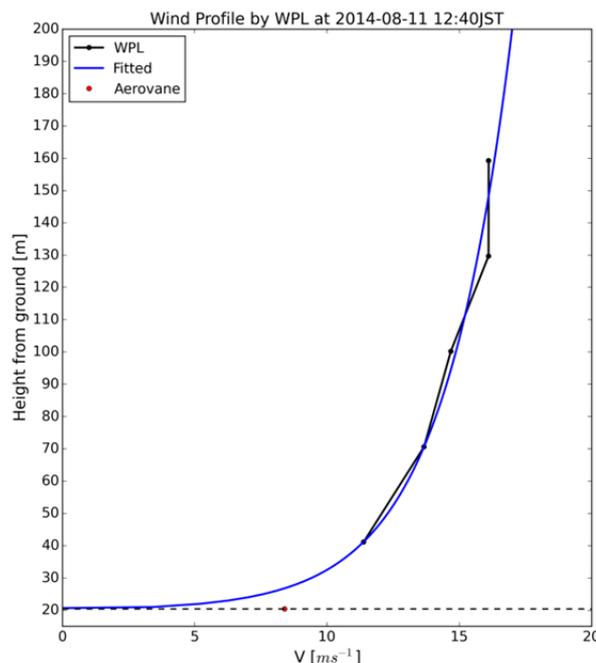


図 9 2014年8月11日1240JSTの風速プロファイル。凡例は図7に同じ。このとき、 $u_* = 1.05\text{m/s}$ ,  $d = 19.98\text{m}$ ,  $z_0 = 0.278\text{m}$ ,  $V_{WPL} = 1.08\text{m/s}$ ,  $V_{Aerovane} = 8.4\text{m/s}$  であった。

る結果、 $V_{Aerovane}$  と  $V_{WPL}$  の乖離が起きたものと考えられる。図8からも、 $15 < d \leq 20$ (青菱形)のデータは  $V_{Aerovane}$  と  $V_{WPL}$  の一致する灰線よりも下側にある点が多くなり、 $V_{WPL}$  が過小評価傾向にあることが読み取れる。この結果を考慮し、 $d$  の閾値を  $0 \leq d \leq 15$ (図8黒丸のみ)としたところ、78個のデータに対してBIAS=0.28m/s, RMSE=1.11m/s となり、差が大きな事例でも  $V_{Aerovane}$  と  $V_{WPL}$  の差は 3.57m/s と誤差が改善した。以上の結果から、 $d$  と  $z_0$  が一定の範囲に収まるような中立成層とみなせる環境下においては、 $V_{Aerovane}$  と  $V_{WPL}$  は整合性が高いといえる。このことから、距離分解能 30m モードで観測された風速プロファイルには妥当性があると考えられる。

### 4. まとめ

測風ライダーの各距離分解能モードの観測データについて、星野・岩淵(2013)による算出及び品質管理手法を用いて風ベクトルを算出し、その精度を検証した。距離分解能 150m モードに関しては、高度 1500m 以下の層では距離分解能 75m と同等の精度の風ベクトルを算出しており、また、取得率に関しては距離分解能 75m モードよりも高いという結果になった。一方、自

由大気と考えられる高度 2000m 以上の層ではゾンデの風速に対して負バイアスが見られた。この要因に関してはゾンデとの水平距離が離れることや誤差の風速依存性の観点から検討を行ったが十分に説明できる理由は得られなかった。ただし、特に第 16 層(高度 2500m)以上はデータの取得率が著しく低く精度評価にはデータ数が不十分であると考えられることから、今回得られた値は参考値としての扱いにとどめるべきと考えられる。

距離分解能 30m モードについては、全体的に取得率が低くなっており、また、下層において風速の正バイアスや  $20^\circ$  を超える  $\overline{\Delta DIR}$  が見られるといった他のモードとは違う特徴が見られた。ただし、BIAS の絶対値は他のモード同様 1m/s 以内であり、ベクトルとしての精度の指標となる RMSVD についても他のモードと差が見られないことから、水平風ベクトルとしては同程度の精度で計算できていると考える。

距離分解能 30m モードで得られた風速プロファイルを境界層における対数則にあてはめる形での風向風速計の風速との比較においては、 $0 \leq d \leq 15$ 、 $0 \leq z_0 \leq 2.2$ かつ中立成層と推定される場合という環境下に限定されるが、風向風速計の風速に対する BIAS=0.28m/s、RMSE=1.11m/s となり整合性の高い結果が得られた。このことから、この環境下では距離分解能 30m モードで得られた風速プロファイルは妥当であると推測される。

本研究の成果をもって全てのモードについて精度検証が完了したことから、観測対象に応じたモードの選択と取得したデータの解釈といった今後の測風ライダーの利用の参考になることが期待される。

#### Appendix A. 風ベクトルの算出と品質管理手法

本研究では星野・岩渕(2013)による視線方向のドップラー速度から VAD 法による風ベクトルの算出及び品質管理を行い、コンセンサス平均(観測部観測課高層気象観測室：2003)により 10 分値とした風データを用いている。ここではそのデータ処理の概要について示す。

一般に、水平風速を  $V_H$ 、風向を  $\varphi$ 、アンテナの方位角を  $\theta$ 、仰角を  $\theta_e$ 、走査円内のエーロゾルの平均落下速度(下向きが正)を  $V_F$  とすると、ドップラー速度  $V_R(\theta)$  は式 10 から求められる。

$$V_R(\theta) = -V_H \cos \theta_e \cos(\varphi - \theta) + V_F \sin \theta_e \quad (\text{式 10})$$

ただし、 $V_R(\theta)$  はライダーに向かう向きを正とする。ここで、式 10 を  $\theta$  について 2 次の項までフーリエ級

数展開した式 11 により近似することを考える。

$$V_R(\theta) = A_0 + A_1 \sin \theta + A_2 \cos \theta + A_3 \sin 2\theta + A_4 \cos 2\theta \quad (\text{式 11})$$

観測されたドップラー速度と方位角のデータから、最小二乗法により  $A_0 \sim A_4$  の係数を決定できたとすると、走査円内の水平風は以下の式 12 及び式 13 から求められる。

$$V_H = \frac{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}}{\cos \theta_e} \quad (\text{式 12})$$

$$\varphi = \tan^{-1}(A_1/A_2) \quad (\text{式 13})$$

また、式 11 における  $A_0$  は鉛直速度と水平発散を含む項となるが、水平発散は鉛直速度と比べ十分に小さいと仮定して、次式により鉛直風速  $w$  を求めた。

$$w = V_F = A_0 / \sin \theta_e \quad (\text{式 14})$$

星野・岩渕(2013)では、この VAD 法における風ベクトルの算出過程において以下のような品質管理を行った。

- (1) ノイズデータと考えられる S/N 比の値の小さい (S/N 比 < 4dB) データを除外した。
- (2) VAD 法に用いたデータの数の不足に起因する式 11 の係数決定のあいまいさを軽減するため、データ数が走査円 1 周分相当の 60% に満たない場合は計算しないこととした。
- (3) 外れ値(VAD 曲線からの誤差が近傍と比較して極端に大きいと考えられるデータの存在による式 11 の係数決定の誤差を軽減するため、標準残差(式 11 を当てはめた場合のドップラー速度から実際に観測されたドップラー速度を差し引いた残差を標準誤差で割った値)が隣り合う方位角の標準残差から 2.0 以上離れている場合はこれを外れ値とみなし、このデータを除去して再度 VAD 法による風ベクトルの計算を行った。
- (4) (2) 及び(3)以外の理由による、式 11 による近似で求めた VAD 曲線分布と実際の方位角ドップラー速度の分布との対応による品質管理のため、対応の指標となる自由度調整済み決定係数(R 二乗値、以下 R2)に注目し、R2 < 0.4 となる算出結果については採用しないこととした。

上記の品質管理を行った 6 秒ごとの算出結果に対して 1 分間のコンセンサス平均(観測部観測課高層気象観測室：2003)をとった風ベクトルを 1 分値とし、この 1 分値からさらに 10 分間のコンセンサス平均をとったものを 10 分値として採用している。

表 4  $z_0$  の推定に用いる土地区分

カテゴリ	土地の利用形態
A	田畑, 道路, ゴルフ場, 空港, 運動場, 湖沼, 河川敷, 海浜, 海水域など
B	果樹園, 森林など
C	建物の密集地, 高層建築物など
D	独立した建物, 民家など

表 5 風向別の各カテゴリの土地の割合と推定  $z_0$

風向	北	東	南	西
a	0.23	0.16	0.52	0.47
b	0.20	0.11	0.16	0.07
c	0.07	0.02	0.01	0.00
d	0.51	0.71	0.32	0.47
$z_0$	0.73	0.72	0.47	0.48

### Appendix B. 土地利用形態からの $z_0$ の推定

桑形・近藤(1990)では, 16 方位の各風向の風上側の中心角  $45^\circ$ , 半径  $100z_A$  ( $z_A$  は風向風速計の設置高度) の扇形領域について, 表 4 に示すカテゴリ A~D の土地の占める割合 a, b, c, d を見積もり, 以下の式 15 により  $z_0$  を推定している.

$$z_0 = 40a + 125b + 200c + 110d - 30 \quad (\text{式 15})$$

$$a + b + c + d = 1$$

本論文では, 測風ライダーの風プロファイルを式 7 に当てはめる場合の  $z_0$  の妥当な範囲の閾値を設定することを目的とするため, 簡便に方位角  $0^\circ$  (北)・ $90^\circ$  (東)・ $180^\circ$  (南)・ $270^\circ$  (西)の 4 方位のみについて方位角  $\pm 45^\circ$ , 半径 2km の扇形領域についてそれぞれ  $z_0$  を見積もった. 各カテゴリの割合は国土数値情報 (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gmlold/index.html>) の「都市地域土地利用細分メッシュ」のメッシュデータ(2009 年度版, 解像度約 100m)を用いて求めた. 各方位の a~d 及び  $z_0$  の値を表 5 に示す. この結果, 測風ライダー設置点における  $z_0$  は 0.47~0.73m 程度と見積もられる.

### 謝 辞

高層気象台観測第一課・第二課の方々には日々の観測データの取得にご協力いただきました. また, 気象研究所環境・応用気象研究部第二研究室の青柳暁典主任研究官には貴重なご意見をいただきました. ここに感謝の意を表します.

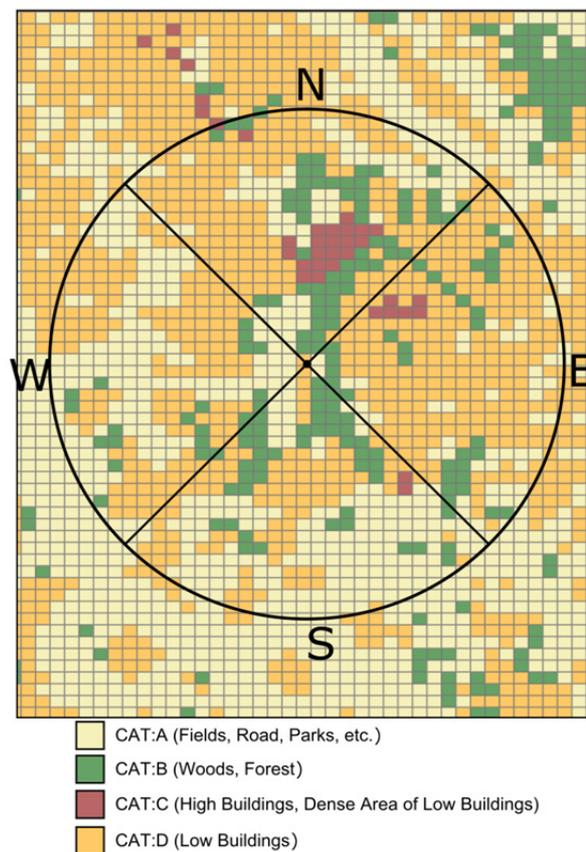


図 10 国土数値情報の都市地域土地利用細分メッシュデータ(2009 年度版)をもとにした高層気象台周辺の土地利用区分. 円の中心が測風ライダーの設置地点にあたり, 円はそこから半径 2km の範囲を, 直線は各方位への分割線を表す. 色は薄黄・緑・赤・黄がそれぞれ表 4 のカテゴリ A~D に対応する.

### 引用文献

- Browning, K. A., and R. Wexler (1968) : The Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler Radar. *J. Appl. Meteorol.*, 7, 105 - 113.
- CGMS (2003) : *Consolidated Report of CGMS Activities*. 10th ed. 127 pp.
- 星野俊介・岩渕真海 (2013) : 視線方向データを用いたドップラーライダーの風ベクトル算出. 高層気象台彙報, 71, 1 - 10.
- 岩渕真海 (2012) : ドップラーライダー観測データ品質管理手法の開発と性能評価. 高層気象台彙報, 70, 23 - 30.
- 古林絵里子 (2015) : 明星 RS-11G 型 GPS ゾンデと Vaisala RS92-SGP 型 GPS ゾンデの相互比較試験観測に

- よる特性評価. 高層気象台彙報, 73, 11 - 24, (印刷中).
- Kotake, N., M. Imaki, and S. Kameyama (2013) : Concept of wind lidar system with the adaptive parameter tuning for various atmospheric conditions. 17th Coherent Laser Radar Conference.
- 桑形恒男・近藤純正 (1990) : 東西南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定. 天気, **37**, 197 - 201.
- 観測部観測課高層気象観測室 (2003) : 局地的気象監視システム(WINDAS)による高層風観測業務の開始. 測候時報, **70**, 63 - 118.
- Szantai, A., and Coauthors (2007) : Comparison of MSG dense atmospheric motion vector fields produced by different methods. *Proc. 2007 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference / 15th AMS Satellite Meteorology & Oceanography Conference*, Proc. 2007 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference / 15th AMS Satellite Meteorology & Oceanography Conference, Amsterdam.
- 山本健太郎 (2009) : 空港気象ドップラーライダーによる非降水低層ウィンドシアアの観測 (気象業務の窓). 天気, **56**, 848 - 854.