

単一ドップラーライダーによる VAD 水平風推定値の品質評価 —ダブルセオドライト法によるパイバル観測値との比較—

渡 来 靖* 中 村 祐 輔** 青 木 翔 太**

キーワード：ドップラーライダー、パイロットバルーン、ダブルセオドライト法、水平風

1. はじめに

大気境界層を含む対流圏下層の流れを詳細に把握することは、雲や降水の発達、乱流輸送を介した大気-陸面相互作用、複雑地形に影響される局地風など、様々な大気現象を理解・予測する上で非常に重要である。近年では、レーダー (radar; radio detection and ranging)、ライダー (lidar; light detection and ranging)、ソーダー (sodar; sonic detection and ranging) などの地上リモートセンシング技術が開発・普及し、時空間的に細密な風データが得られるようになってきた。これらの機器や取得データは、天気予報の精度向上、大気乱流構造の理解、風力エネルギー開発のための風況観測などの様々な目的で活用されている。

ドップラーライダー (Doppler lidar; 以下、DL と呼ぶ) は、光アンテナからレーザー光を大気中に送信し、エアロゾルにより散乱されて戻ってきた光を受信する。この送信波と受信波のドップラーシフトから視線方向風と分散、信号雑音比を測定する。アンテナを走査することで、風の3次元的な分布を測定することができる。DL はその高い時空間分解特性により、大気境界層内の対流や複雑な乱流構造を測定することができる。立正大学では2015年3月より可搬型の小型 DL が導入され、定期的に観測が実施されている。例えば2015年7月26日の立正大学熊谷キャンパスにおける観測結果からは、弱風晴天で鉛直シアの存在する大気境界層内において100mスケールの水平ロール状対流が見られたことが高咲ほか (2016) により報告されている。

DL は、高出力の機器を使用するかパルス幅を調整するなどして観測範囲を広げ、数 km スケールの風の水平分布や鉛直構造を観測することも可能である。大気の鉛直プロファイル観測はゾンデ観測が主軸であるが、DL を利用することにより非常に高い時間分解能で現象の変動

を捉えることができる。現在ではいくつかの機関において DL を用いた風の鉛直プロファイル観測がルーチ的に実施されている。DL 観測とゾンデ観測の比較結果がいくつか報告されており (岩渕2012; 星野・岩渕2013; 鈴木ほか2016)、両者は概ねよく一致した結果が得られている。立正大学に導入された DL システムについても、風の鉛直プロファイル観測に活用していく上で、他の観測値と比較し DL 観測値の特徴を明確にしておくことは重要である。

そこで本研究では、立正大学に導入された DL 観測データより得られる水平風の鉛直プロファイルについて、他の独立した観測手法により得られた水平風と比較することによって品質評価を行うことを目的とする。DL 観測とともにパイロットバルーン (pilot balloon; 以下、パイバル) による観測を実施し、両観測値を比較することで評価する。パイバル観測は上昇する気球を追跡しながら測量して割り出した気球の位置から風を求める直接観測手法であり、比較値として妥当と言える。

2. 観測概要

DL とパイバルによる同時観測は2016年8月4日に、埼玉県熊谷市にある立正大学熊谷キャンパス内で実施された。観測点の配置図を図1に示す。

パイバル観測については、地点Pを放球地点とし、地点A、Bに2台のセオドライトを設置して同時に1つの気球を追跡する、ダブルセオドライト法を採用した。以後、地点Aに設置したセオドライトを一号機、地点Bのものを二号機と呼称する。今回の観測で用いたセオドライトは、どちらもタマヤ計測システム株式会社製 TD-4である。測定される高度角、仰角の記録間隔は2秒とした。それぞれのセオドライトの方位角は磁北を基準に設定されたので、解析時には偏角を補正して真北に変換した。

* 立正大学地球環境科学部

** 立正大学大学院地球環境科学研究科大学院生

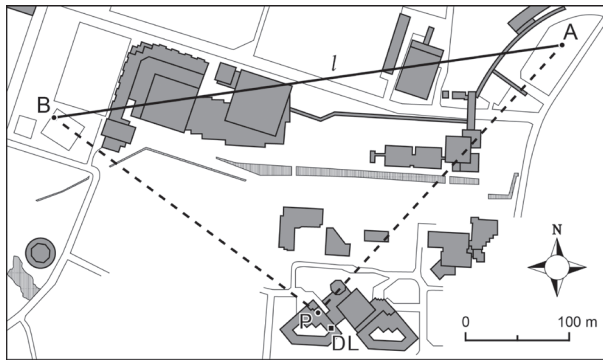


図1 観測地点の地図。A（一号機）、B（二号機）はそれぞれセオドライトの設置点、Pはパイバル放球地点、DLはDLの設置点。 l は地点AB間の水平距離（ $l=512\text{m}$ ）を意味する

偏角は、国土交通省国土地理院の地磁気測量ホームページ（<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/>）で公開されている地磁気値計算フォームを利用して観測地点における2010年1月1日0時（協定世界時）の値を求めた $7^{\circ}16'$ 西偏を用いた。放球は9時30分と、10時00分以降1時間毎に18時00分までの計10回行った。放球地点Pは、キャンパス内の学生寮（ユニデンス）B館の屋上とした。毎回の放球直前に2台のセオドライトにより放球地点Pの方位角および仰角を測定し、それら10回の観測データから地点Pの地点Aに対する比高を $47.7 \pm 0.1\text{m}$ と見積もった。それに、国土交通省国土地理院が提供する基盤地図情報数値標高モデル5mメッシュデータから求めた地点Aの標高（48.5m）と、観測時に測定した一号機の三脚高さ（134.3cm）を加算し、放球地点Pの標高を97.5mとした。AB二地点間の水平距離 l およびA地点から見たB地点の方位角は、Google Earthの「定規」機能を利用して計測を行い、 $l=512\text{m}$ 、方位角 261.92° とした。AB二地点の比高（Bの標高－Aの標高）については、基盤地図情報数値標高モデル5mメッシュデータより求めた各地点の標高と、各測器の三脚高さから 0.36m と見積もった。なお、気球には20g型パイバル用気球を用い、ヘリウムガスを充填して55.7g重の純浮力を与えた。これは実験式によれば気温 0°C の海拔高度付近の条件で気球の上昇速度 2.5m/s に相当する。

パイバル観測では、気球を観測者の手動により追跡するため、精度の良い観測結果を得るためには熟練を要する。今回の観測は十分なパイバル観測経験のある観測者が実施するとともに、気球を視野内に捉えたり見失ったりしたタイミングでセオドライトの「MISS」ボタンを押すことにより識別フラグを記録し、2台のうち1台でも気球を追跡できなかった時刻のデータは使用しないこと

表1 DL (LR-S1D2GA) の主な仕様

レーザー光波長	1.55 μm 帯		
距離分解能	30m	75m	150m
観測範囲	60～630m	75～1500m	150～3000m
送信光パルス幅	200ns	500ns	1000ns
変復調方式	パルス変調方式		
レンジビン数	20（0～19）		
ドップラー速度範囲	－30～30m/s		
送信繰り返し周波数	16kHz \pm 5 %		
光アンテナ駆動方法	方位角、仰角独立駆動		
光アンテナ走査方式	二軸走査方式		
方位角走査範囲	－90～+90°		
仰角走査範囲	－5～+90°		
駆動速度	1.0～20.0°/s（水平方向） 1.0～10.0°/s（垂直方向）		
駆動角読み取り分解能	0.01°		
走査パターン	POINTING, PPI, RHI, VPPI, VRHI		

表2 DL 観測の主な設定値

距離分解能	150m
観測範囲	150～3000m
観測モード	PPI
ビーム仰角	69°
方位角走査速度	6.0°/s
パルス積分回数	4000

とした。また、本研究で採用したダブルセオドライト法は、気球上昇速度一定の仮定を必要とせず気球の位置を確定できる点や、観測値の不確実性を評価できる点が利点である。ダブルセオドライト法による水平風鉛直プロファイルの算出や不確実性の評価方法については、第4節において概説する。

DL観測に用いた機器は、三菱電機株式会社製のコヒーレントドップラーライダー LR-S1D2GAである。主な仕様を表1に、今回の観測における主な設定を表2に示す。DLは、パイバル放球地点と同じ建物の屋上に設置した（図1の点DL）。したがって、DLの設置標高は放球地点と同じ97.5mとした。DLの観測モードはPPI（Plan Position Indicator）走査とし、ビーム仰角 69° と 90° の2種類の観測を交互に繰り返し、仰角 69° では $6.0^{\circ}/\text{s}$ 、 90° では $20^{\circ}/\text{s}$ で水平走査したが、今回は仰角 69° のデータのみを用いた。 69° のPPI走査は、約1分に1回の頻度で実行された。

3. データの品質管理と平均化処理

今回の DL 観測で用いた LR-S1D2GA では、本体装置内蔵のソフトウェアにより、高仰角 PPI 走査を行った際に 1 回の観測ごとに VAD (Velocity Azimuth Display) 法によって風速・風向を算出、出力している。VAD 法では、一定仰角で 360°PPI 走査した際に走査円上の風が一様であるとするれば測定されるドップラー速度が方位角に対する正弦関数となることを利用し、観測されたドップラー速度をフーリエ変換するか正弦関数にフィッティングさせるかして、水平風を求める。このように、本来の VAD 法では 360° 水平走査したドップラー速度から水平風を求めるが、LR-S1D2GA では 1 台につき最大で 180° までしか水平走査できない。LR-S1D2GA では、180° 水平走査して得られたドップラー速度を正弦関数にフィッティングさせ、水平風を算出している (三菱電機株式会社 2015)。今回は、このように本体に内蔵ソフトウェアによって出力された水平風のデータを用いた。1 回の PPI 走査につき 1 つの水平風鉛直プロファイルが出力されるので、DL 観測による水平風データの時間分解能は約 1 分である。なお、DL 観測値における方位も磁北が基準となっているため、風向についてはパイバルデータと同様に 7°16' 西偏で補正して真北が基準となるように変換した。また、岩渕 (2012) が指摘するように、DL 観測距離は本体装置の光送受信ユニットが基点となっているため、光アンテナ装置からの距離は光ケーブルの長さ (5 m) 分短い。今回は、光ケーブル長さ分の距離を補正した高度を算出し、DL 測定高度とした。

今回用いた DL では、データの品質管理のため、測定値の信号雑音比が 7 dB 以下の場合にはドップラー風速を出力しない。また、VAD 法による水平風自動演算処理において、走査円上で取得されたデータ数が 10 個に満たない場合には水平風を出力しないようになっている。しかし、出力された VAD 水平風の一部には不自然と思われるデータが含まれており、それは取得データ数が少ないときに該当するケースが多かった。そこで、取得データ数が 50 個未満のデータについては使用しないこととした。本研究の観測設定において 1 回の PPI 走査で取得可能なデータ総数は 117 個であるから、取得データ数 50 個はその 42.7% に相当する。

DL データをパイバルデータと比較するにあたり、できるだけ同高度、同時刻における両データを比べる必要がある。高度分解能は、DL データが約 140 m (= 150 × sin 69°) であるのに対してパイバルデータが約 5 m (上

昇速度 2.5 m/s の気球を 2 s 毎に測定) でより細かい。そこで、DL データの高度分解能に合わせてパイバルデータを平均化する処理を行った。まず、2 秒サンプリングで取得したパイバル観測による気球の方位角、仰角をもとに水平風速、風向を算出し、時間方向に 56 秒 (28 点) 移動平均を施した。ここで、風向については単位ベクトル平均とした。次に、同じく 56 秒移動平均した気球高度が DL 観測高度と最も近い移動平均風速、風向データを抽出した。56 秒移動平均を施した理由は、気球の上昇速度が 2.5 m/s で一定とすれば 56 秒で 140 m 上昇するためであり、平均化されたパイバルデータは厚さ約 140 m の気層平均値とみなせる。このように求めたパイバルデータを用いることで、DL データと同じ高度、同じ高度分解能のデータとして比較できる。

パイバル観測は上昇する気球を追跡することで上空の風速を求めるため、その観測原理上、一回の観測においても上空ほど観測時刻が遅れる。そこで、各高度における両データを比較する際には、上述のように求めた平均化パイバルデータの中心時刻を求め、それを基準時刻とした。岩渕 (2012) は、DL の 7 秒サンプリング値と 10 分平均値を地上の風速計や GPS ゾンデによる水平風と比較した結果、7 秒値は 10 分値に比べて大きな短時間変動成分を含んでいることや、10 分値の方が風速計やゾンデによる風とよく一致したことを示した。DL 観測が捉える大気エアロゾルの挙動は乱流の影響を大いに受けているため、瞬間値では乱流成分を多く含むが、パイバルの挙動はより平均的な流れに影響されと考えられるため、DL データは時間平均値を用いるのが妥当である。そこで岩渕 (2012) に倣い、DL データは基準時刻を中心とする 10 分間に含まれる同高度の観測値を単純平均したものを求め、パイバルデータと比較した。平均値を求める際には、基準時刻を中心とする 10 分間に含まれる同高度の VAD 水平風データを v_1, v_2, \dots, v_N とすると、 $N \leq 4$ であれば四分位値 $Q_{1/4}$ 、 $Q_{3/4}$ と四分位範囲 $\Delta Q = Q_{3/4} - Q_{1/4}$ を求めて各データ v_i が $Q_{1/4} - 1.5\Delta Q \leq v_i \leq Q_{3/4} + 1.5\Delta Q$ の範囲に含まれるかどうか判定し、含まれない場合は外れ値として除外した。DL のサンプリングデータには、観測時刻のごく近い同高度のデータ集合の中で他とは大きく外れた値が含まれることがしばしばあるため、本研究ではこれをノイズと考えて上述の四分位範囲による処理によって平均操作から除外した。なお、同高度、同時刻における DL の走査範囲にパイバル観測点が含まれるとは限らないが、本研究では両データの水平方向の観測位置のずれを補正する処理は行わなかった。

4. ダブルセオドライト法

パイバル観測では、ヘリウムや水素を充填した気球を放ちその位置をセオドライトで測量することにより、気球の位置変化から水平風の鉛直プロファイルを求める。実際には、1台のセオドライトで気球を追跡する方法（シングルセオドライト法）が用いられることが多い。シングルセオドライト法の場合、セオドライトで測定される1組の高度角、仰角のみでは気球の位置を特定することができないので、気球の上昇速度が一定であるとして気球の高度を求め、それを加えて気球の3次元位置を確定する。一方、1つの気球を2台のセオドライトで同時に追跡するダブルセオドライト法は、2台のセオドライトから同時に得られる2組の高度角、仰角データによって、理論上気球の3次元位置を決めることができ、気球の上昇速度一定を前提とする必要がないことが大きな利点である。また、気球の上昇速度一定を仮定すれば、ダブルセオドライト法によって決定された気球高度の時間変化と気球上昇速度との差から鉛直風を見積もることもできる。近年実施されたダブルセオドライト法を用いた日本の研究例として、佐々木ほか（2004）は山形県庄内平野で起こる清川だしの観測においてダブルセオドライト法によるパイバル観測を行い、清川だし発生時の風の鉛直構造を明らかにし、高度200m付近に最強風帯が出現することなどを明らかにしている。また、中川ほか（2009）では、長野県長野市で実施されたダブルセオドライト法によるパイバル観測データより得られたパイバル高度に関して、その特徴や精度について議論している。

上述のように、ダブルセオドライト法では2台のセオドライトから高度角、仰角がそれぞれ測定され、計4つの角度が得られる。しかし、気球の3次元位置は3つの角度が定まれば決定することができるため、観測された4つの角度から気球の位置を決めようとする、特別な場合を除き一意には決められない。そのため、測定された4つの角度のうち3つを使って気球の位置を求める方法が採用されることがあるが、この方法では測定値に誤差が含まれていた場合、選択した角度の組み合わせによって得られる位置に大きな違いが生じてしまうといった問題点がある（Schaefer and Doswell III 1978）。そこでThyer（1962）は、ダブルセオドライト法で測定される4つの角度全てを用いて気球の位置を決定する方法を考案した。本研究では、Thyer（1962）の方法により気球の3次元位置を算出した。

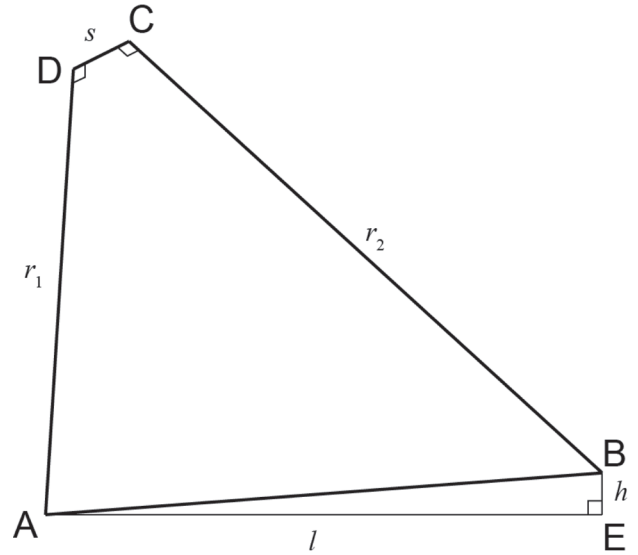


図2 ダブルセオドライト法による気球位置算出の概念図。A、Bはそれぞれ一号機、二号機の設置点を表し、AD、BCはそれぞれ一号機、二号機の視野中心線である

図2は、Thyer（1962）の方法による気球位置算出の概念図である。点A、Bがそれぞれ一号機、二号機の位置を表し、点Bから点Aと同高度の水平面に下ろした垂線の足を点Eとすると、 $AE=l$ はA B間の水平距離、 $BE=h$ は比高である（本研究において、 $l=512\text{m}$ 、 $h=0.36\text{m}$ である）。Thyer（1962）の方法では、2台のセオドライトから延びる2本の視野中心線（AD および BC）の両方と直交する短い線分 DC を考え、気球の最適位置はその線分 DC 上にあると考える。以下、算出方法について概説する。

簡単のため、点Aを原点とし、点Bを y 軸上 ($y > 0$) にとる。AD、BC の長さをそれぞれ r_1 、 r_2 とすると、ベクトル **AD**、**BC** はそれぞれ

$$\mathbf{AD} = r_1 \{ \cos \theta_1 \sin(\varphi_1 - \Delta\varphi) \mathbf{i} + \cos \theta_1 \cos(\varphi_1 - \Delta\varphi) \mathbf{j} + \sin \theta_1 \mathbf{k} \} \quad (1)$$

$$\mathbf{BC} = r_2 \{ \cos \theta_2 \sin(\varphi_2 - \Delta\varphi) \mathbf{i} + \cos \theta_2 \cos(\varphi_2 - \Delta\varphi) \mathbf{j} + \sin \theta_2 \mathbf{k} \} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 φ_1 、 φ_2 は一号機、二号機の方角、 θ_1 、 θ_2 は一号機、二号機の仰角、 $\Delta\varphi$ は一号機から見た二号機の方角、**i**、**j**、**k**はそれぞれ x 、 y 、 z 方向の単位ベクトルである。DC の長さを s とし、ベクトル **DC** を

$$\mathbf{DC} = s(a\mathbf{i} + b\mathbf{j} + c\mathbf{k}) \quad (3)$$

と置くと、DC が最短となるためには **DC** と **AD**、**BC** が

それぞれ直交すれば良いので、

$$\begin{aligned} a \cos \theta_1 \sin(\varphi_1 - \Delta\varphi) \\ + b \cos \theta_1 \cos(\varphi_1 - \Delta\varphi) + c \sin \theta_1 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a \cos \theta_2 \sin(\varphi_2 - \Delta\varphi) \\ + b \cos \theta_2 \cos(\varphi_2 - \Delta\varphi) + c \sin \theta_2 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

また、 $a\mathbf{i} + b\mathbf{j} + c\mathbf{k}$ は単位ベクトルであるから、

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1 \quad (6)$$

式(4)~(6)より、係数 a 、 b 、 c は次のように求まる。

$$a = \frac{\alpha}{\delta} \quad (7)$$

$$b = \frac{\beta}{\delta} \quad (8)$$

$$c = \frac{\gamma}{\delta} \quad (9)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \alpha &= \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos(\varphi_2 - \Delta\varphi) \\ &\quad - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\varphi_1 - \Delta\varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \beta &= \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin(\varphi_1 - \Delta\varphi) \\ &\quad - \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin(\varphi_2 - \Delta\varphi) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \cos \theta_1 \cos \theta_2 \{\cos(\varphi_1 - \Delta\varphi) \sin(\varphi_2 - \Delta\varphi) \\ &\quad - \sin(\varphi_1 - \Delta\varphi) \cos(\varphi_2 - \Delta\varphi)\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\delta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} \quad (13)$$

次に図2より、 $\mathbf{AD} + \mathbf{DC}$ と $\mathbf{AB} + \mathbf{BC}$ は等しくなければならぬので、

$$\begin{aligned} r_1 \{\cos \theta_1 \sin(\varphi_1 - \Delta\varphi) \mathbf{i} + \cos \theta_1 \cos(\varphi_1 - \Delta\varphi) \mathbf{j} \\ + \sin \theta_1 \mathbf{k}\} + s(a\mathbf{i} + b\mathbf{j} + c\mathbf{k}) \\ = (l\mathbf{j} + h\mathbf{k}) + r_2 \{\cos \theta_2 \sin(\varphi_2 - \Delta\varphi) \mathbf{i} \\ + \cos \theta_2 \cos(\varphi_2 - \Delta\varphi) \mathbf{j} + \sin \theta_2 \mathbf{k}\} \end{aligned} \quad (14)$$

この恒等式(14)を解けば、係数 r_1 、 r_2 、 s はそれぞれ以下のよう求まる。

$$r_1 = \frac{l\{c \cos \theta_2 \sin(\varphi_2 - \Delta\varphi) - a \sin \theta_2\} + h \cos \theta_2 \{a \cos(\varphi_2 - \Delta\varphi) - b \sin(\varphi_2 - \Delta\varphi)\}}{a\alpha + b\beta + c\gamma} \quad (15)$$

$$r_2 = \frac{l\{c \cos \theta_1 \sin(\varphi_1 - \Delta\varphi) - a \sin \theta_1\} + h \cos \theta_1 \{a \cos(\varphi_1 - \Delta\varphi) - b \sin(\varphi_1 - \Delta\varphi)\}}{a\alpha + b\beta + c\gamma} \quad (16)$$

$$s = \frac{l\beta + h\gamma}{a\alpha + b\beta + c\gamma} \quad (17)$$

上述のように、気球は線分 DC 上に存在するはずである。線分 DC の長さが0でないということは、少なくとも1台のセオドライトの測定値に誤差が含まれることを意味する。もし2台のセオドライト測定値に同じ視野角分の誤差が含まれていると仮定すれば、 $DF : FC = r_1 : r_2$ となる点Fに気球は存在する。したがって、気球の最適位置F (x, y, z) は以下のように求まる。

$$x = r_1 \cos \theta_1 \sin(\varphi_1 - \Delta\varphi) + \frac{r_1}{r_1 + r_2} sa \quad (18)$$

$$y = r_1 \cos \theta_1 \cos(\varphi_1 - \Delta\varphi) + \frac{r_1}{r_1 + r_2} sb \quad (19)$$

$$z = r_1 \sin \theta_1 + \frac{r_1}{r_1 + r_2} sc \quad (20)$$

また、セオドライト測定値に含まれる視野角誤差 $\Delta\phi$ は、

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{s}{r_1 + r_2} \right) \quad (21)$$

となる。

Netterville and Djurfors (1979) は、ダブルセオドライト法によるパイバル観測において、観測値に含まれる不確実性を検討した。それによると、風速および風向の不確実性 ΔU 、 Δd はそれぞれ、

$$\Delta U = \frac{\sqrt{\Delta L_n^2 + \Delta L_{n-1}^2}}{\Delta t} \quad (22)$$

$$\Delta d = \sqrt{\left\{ \sin^{-1} \left(\frac{\Delta L_n}{U \Delta t} \right) \right\}^2 + \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{\Delta L_{n-1}}{U \Delta t} \right) \right\}^2} \quad (23)$$

と見積もられる。ここで、

$$\Delta L_n = \frac{1}{2} l \Delta \phi \sec^2 \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{2 U t_n}{l} \right) \right\} \quad (24)$$

$$\Delta L_{n-1} = \frac{1}{2} l \Delta \phi \sec^2 \left[\tan^{-1} \left\{ \frac{2 U (t_n - \Delta t)}{l} \right\} \right] \quad (25)$$

であり、 U は風速、 Δt はデータのサンプリング間隔、 $\Delta \phi$ は視野角の分解能、 t_n は放球からの経過時間である。式(22)、(23)より、ダブルセオドライト法によって観測される風速や風向は、サンプリング間隔 Δt や2台のセオドライト間の距離 l が短いほど不確実性が急速に高まることかわかる。また、経過時間 t_n や視野角の分解能(誤差) $\Delta \phi$ が大きくなるほど、不確実性は高くなる。

5. DL 観測とパイバル観測の比較

比較観測を実施した2016年8月4日は、日本付近は北日本を除いて南北に延びる高压帯の勢力下にあり、関東地方は全般に晴天となった。熊谷地方気象台の観測記録によれば、日最高気温は16時00分に34.7℃を記録し、日照時間は11.1時間であった。図3に、パイバル観測で得られた気球の航跡図を示す。9時30分の観測値では、気球はまず南東方向に流されており、下層では北西寄りの風が吹いていることがわかる。11時00分の観測では、気球は時計回りに進行方向を変えながら放球点付近を上昇している。13時00の観測では西～西北西方向に流され、14時00分には北西、17時00分や18時00分には北と、下層の風向が時間経過とともに時計回りに変化している様子が見られる。

図4は、個々のパイバル観測について、DLとパイバルで観測された水平風速および風向を比較した図である。図4には全10事例のうち、DLとパイバルがともに標高1500m付近までおおよそデータが取得できた(a)9時30分、(b)14時00分、(c)17時00分および(d)18時00分の結果のみ示す。黒実線で描かれた要素がDL、灰破線がパイバルの観測値を意味している。パイバル観測値には、厚さ約140m気層平均(56秒移動平均)の風速および風向に

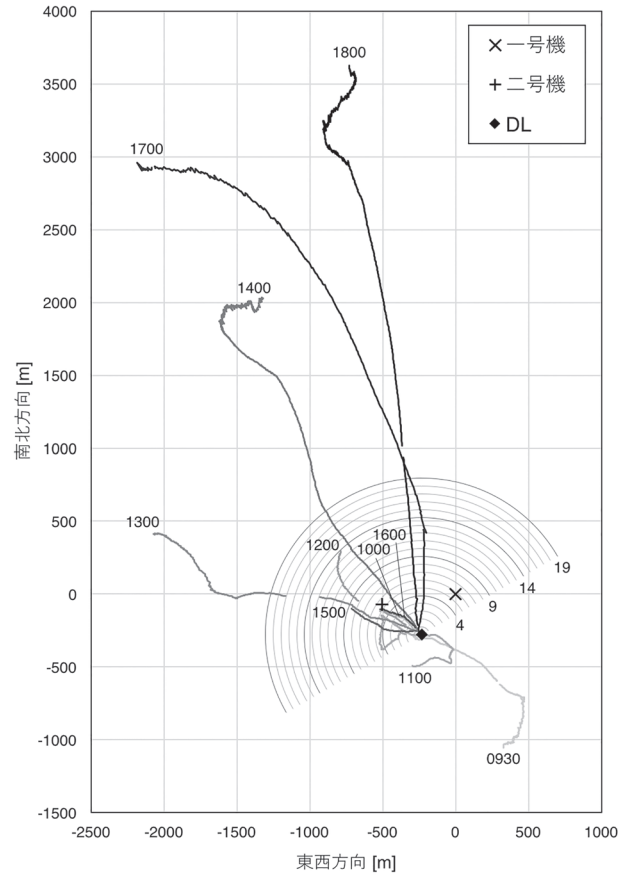


図3 パイバル観測の航跡図。太線は各観測における気球軌跡の水平面投影図であり、4桁の数字は放球時刻を表す。×、+、◆はそれぞれ一号機、二号機、DLの設置点を示す。半円はDLの走査半円であり、数字はレンジビン番号を意味する

加えて、観測値から式(21)によって求めた視野角換算誤差 $\Delta \phi$ および $\Delta t=56s$ を与えて式(22)、(23)により算出された風速および風向の不確実性 ΔU 、 Δd の範囲も示している。全体的に見ると、各事例の水平風の高度変化傾向はDLとパイバル両観測で類似していると言えるが、両観測の差は事例による違いが大きい。図4に示した4事例では、9時30分の事例が他の3事例に比べて両観測の差が大きい。特に風向については、高度500m以下でDL風向がパイバル風向に比べて90°～130°程度時計回りにずれている。一方、午後に観測された3事例については、両観測は比較的良く一致している。特に、14時00分の事例の風向や18時00分の事例の風速(高度1000m以下)は両者にほとんど差がなく、それらの鉛直分布も非常によく一致している。14時00分と17時00分の風速については、DL風速がパイバル風速に比べて、1000m以下の高度で1m/s程度過小傾向であるが、風速極大を示す高度などの特徴はおおよそ一致している。17時00分や18時00分の風向については、DLがパイバルに比べて時計回りにずれているが、その差は10～20°程度である。また、図4に

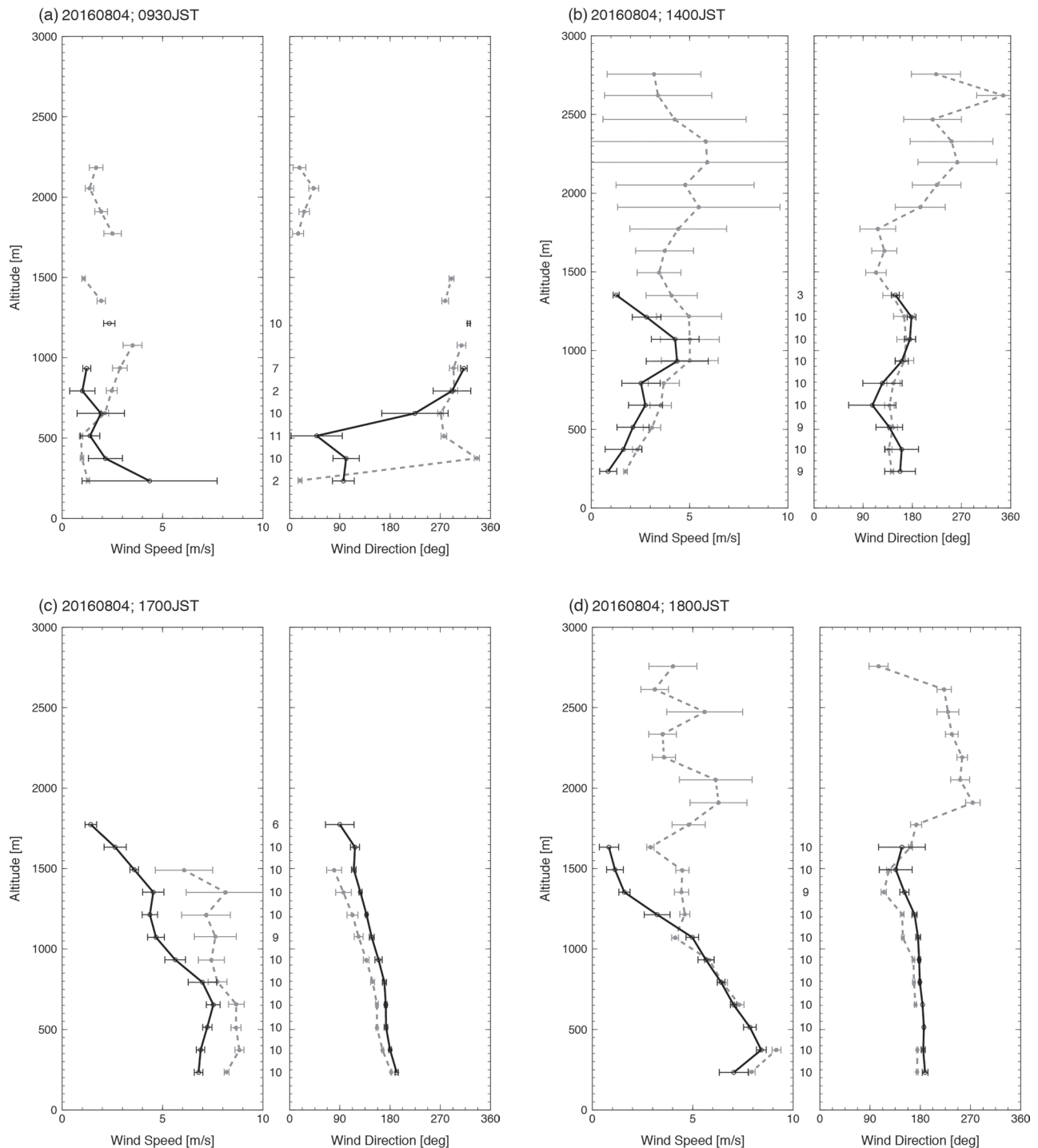


図4 DLとパイバルによる水平風同時観測の比較図。黒実線はDL観測値の高度毎の10分平均値であり、エラーバーは標準偏差、各図中央の数字は各高度のDL観測数を意味する。灰色はパイバル観測値（破線）およびその不確か性の範囲（エラーバー）を示す。2016年8月4日(a)9時30分、(b)14時、(c)17時および(d)18時の観測結果であり、それぞれ左側は風速、右側は風向の結果である

は黒実線のエラーバーでDL観測値の標準偏差が示されているが、これに着目するとDL観測値のばらつきの大きい事例・高度ではDLとパイバルとの差が大きく、ばらつきが小さいほど差が小さくなる傾向が見られる。

図5は、全10事例について比較高度における風速および風向のバイアス（DL観測値－パイバル観測値）を求

め、事例ごとに単純平均した値（実線）とその標準偏差（エラーバー）を示している。風速バイアス（図5a）は事例ごとの違いが大きく各事例の標準偏差も大きい、事例平均値は $-2 \sim 2$ m/sを示している。サンプル数の多い9時30分(6)、14時00分(9)、17時00分(10)および18時00分(10)の風速バイアスを見ると、9時30分は0.23m/sで若

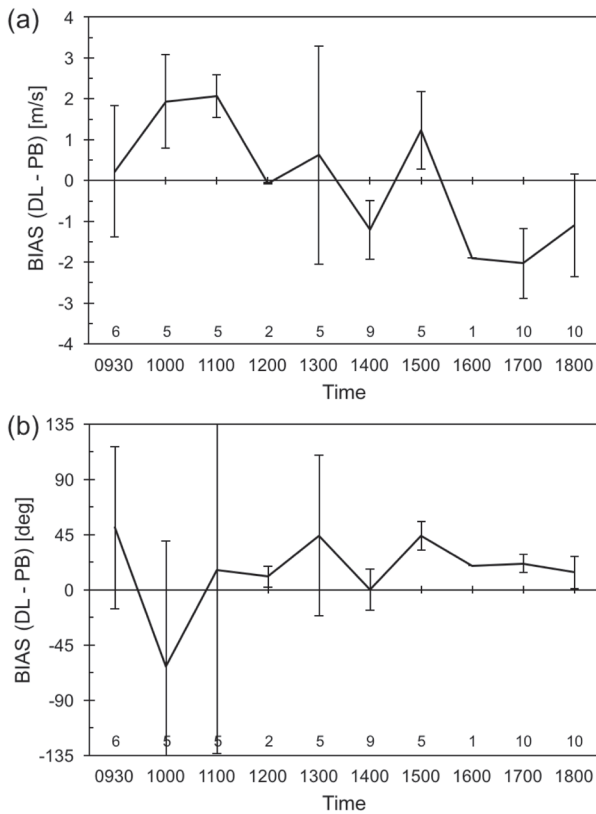


図5 各観測における (a) 風速バイアスおよび (b) 風向バイアスの平均値 (太実線) と標準偏差 (エラーバー)。図下の数字はサンプル数を表す

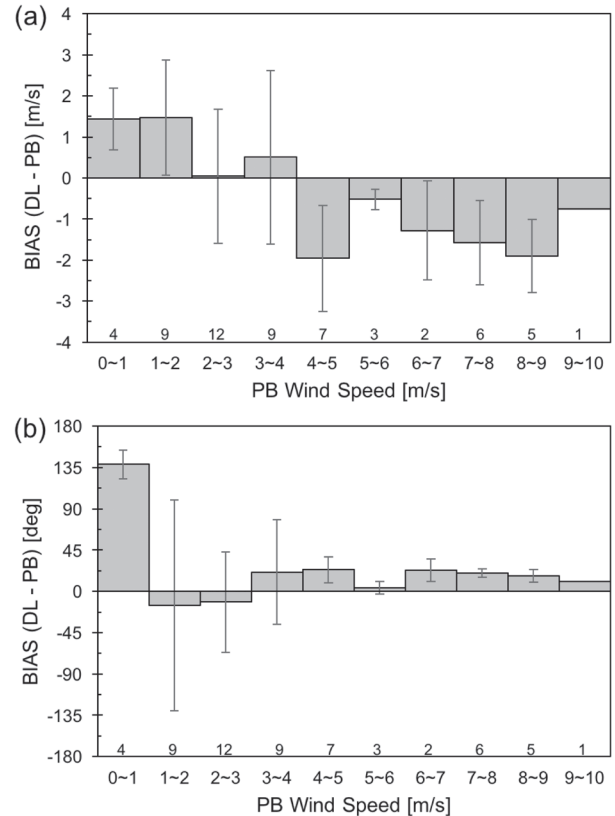


図6 パイバル風速階級別の (a) 風速バイアスおよび (b) 風向バイアスの平均値 (棒グラフ) と標準偏差 (エラーバー)。図下の数字はサンプル数を示す

干の正值であるが、その他の平均はどれも負値を示しており、パイバルに比べて DL が過小となる傾向を示唆する。風向バイアス (図5 b) を見ると、午前の観測事例では大きさが45°を超えるような大きな平均バイアスを示しばらつきも大きい、12時00分以降の午後の観測では両観測の差が比較的小さく、13時00分の観測を除いてはばらつきも小さい。午後の観測における風向バイアスは、13時00分と15時00分の観測は約44°でやや大きい、それ以外では22°以下であり、これは16方位における1方位分の違いと同程度かそれよりも小さい。

図6は、図5と同様の風速、風向バイアスについて、事例や高度についての区別はせず、パイバル風速の階級別で分類した結果である。風速バイアス (図6 a) の階級別平均を見ると、風速が4 m/s 以下の弱いときには DL 風速が過大傾向であるのに対し、4 m/s 以上の強風時には DL 風速が過小傾向となることがわかる。今回の観測で得られた風速4~10 m/s のときの風速バイアスは-2.0~-0.5 m/s を示した。しかし、各階級の風速バイアスの標準偏差は比較的大きく、個々の事例による違いが大きいことを示唆する。風向バイアス (図6 b) の階級別平均について見ると、弱風時には個々のデータのばらつき

が非常に大きくなっているが、風速3~4 m/s 以上の強風時になるとばらつきは比較的小さくなり、階級平均の風向バイアスは4~24°を示し DL 風向が若干時計回りにずれている。この傾向は、図5(b) で見られた午後の観測事例における傾向とよく似ている。

次に、全10事例のデータを用いて、高度ごとの両観測値について比較する。その際、高層気象台における DL とゾンデのデータを比較検証した星野・岩渕 (2013) の手法に倣い、これまで用いてきた風速および風向バイアスに加えて、風ベクトル差の二乗平均値 $RMSVD$ および風向差の平均値 $\overline{\Delta DIR}$ も算出し、比較した。 $RMSVD$ および $\overline{\Delta DIR}$ はそれぞれ以下の式 (26)、(27) によって求めた。

$$RMSVD = \sqrt{MVD^2 + SD^2} \quad (26)$$

$$\overline{\Delta DIR} = \frac{180}{N\pi} \sum_{i=1}^N \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{v}_{L,i} \cdot \mathbf{v}_{P,i}}{|\mathbf{v}_{L,i}| |\mathbf{v}_{P,i}|} \right) \quad (27)$$

ここで、 N はサンプル数、 $\mathbf{v}_{L,i}$ 、 $\mathbf{v}_{P,i}$ はそれぞれ DL およびパイバルの水平風ベクトルであり、

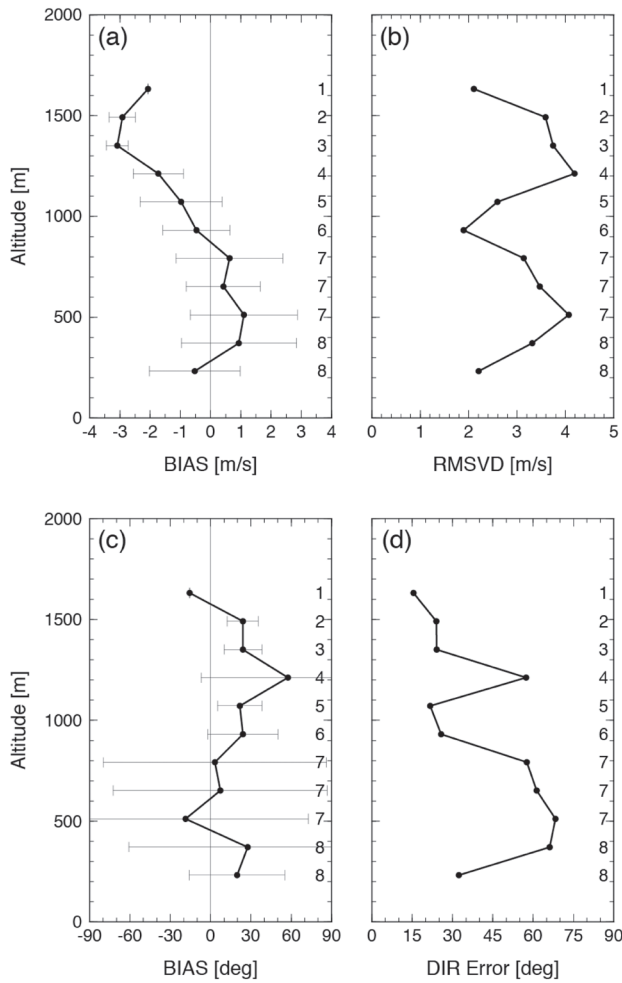


図7 (a) 風速バイアスの平均と標準偏差、(b) $RMSVD$ 、(c) 風向バイアスの平均と標準偏差、および (d) $\overline{\Delta DIR}$ の高度分布。各図右の数字はサンプル数を示す

$$MVD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |v_{L,i} - v_{P,i}| \quad (28)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|v_{L,i} - v_{P,i}| - MVD)^2} \quad (29)$$

である。図7は、高度別の (a) 風速バイアス、(b) $RMSVD$ 、(c) 風向バイアスおよび (d) $\overline{\Delta DIR}$ を示す。風速バイアスは高度約900m以下の下層で正、上層で負となる傾向が見られる。この傾向は、星野・岩渕 (2013) において DL 自動出力の VAD 水平風についてゾンデと比較した結果 (星野・岩渕2013の図5に破線で示される) と類似している。 $RMSVD$ は高度約900m付近で極小で約1.9m/sを示しており、最下層でも値は比較的小さく約2.2m/sである。しかし、 $RMSVD$ はどの高度も2~4 m/sの値を示している。これは風速の誤差としては大きく、星野・岩

渕 (2013) の結果と比較すると1000m以上の上層では同程度であるが、下層では2倍前後大きい。風向バイアスについては、高度約900mを境に下層では平均はほぼ0であるがばらつきが非常に大きく、上層では正の傾向が見られる。上層側の高度1000~1500m付近は風向バイアスのばらつきが比較的小さく、 $\overline{\Delta DIR}$ も20~30°程度と他の高度に比べて小さい。星野・岩渕 (2013) における $\overline{\Delta DIR}$ の結果では高度約700mより下層では15°程度であり上層では高度とともに大きくなる分布を示しているが、今回の結果はそれとは逆の傾向である。しかしながら、今回の結果はサンプル数が非常に少ないため、星野・岩渕 (2013) の結果との違いに意味があるかどうか議論することは難しい。

6. DL データ平均時間の影響

上述のように、個々の DL 観測で得られる風データは乱流成分を多く含んでおり、パイバル観測値と比較するためには時間平均値を用いるのが妥当と考えられる。しかし、本研究の目的に対してどのくらいの時間幅で平均するのが相応しいであろうか。そこで、今回の観測データにおいて、DL データの平均時間幅を変えることによってパイバルデータとの風速・風向差がどのように変化するのか調査した。

図8の実線は、基準時間を中心に DL データを平均した時間幅に対する、 $RMSVD$ の全事例・高度平均値を表している。平均時間幅を長くするほど $RMSVD$ が小さくなる傾向が見られる。時間幅が短い範囲では特にその傾向が大きい。時間幅が15~20分の長さになると $RMSVD$ はおおよそ2.8m/sに収束し、20~30分ではほぼ一定となっている。なお、 $\overline{\Delta DIR}$ の平均値についても平均時間幅による変化を示す (図8の破線) と、 $\overline{\Delta DIR}$ も $RMSVD$ と同様に時間幅が長くなるにつれて小さくなる傾向があるが、時間幅30分までの範囲では $RMSVD$ のように20分以上で収束する傾向は見られない。

平均化時間を長くするほど $RMSVD$ が低下し20分でおおよそ極小となった理由として、時間スケールの短い乱流成分が平均化でフィルターされたことが考えられる。しかし、今回のパイバル観測において気球には上昇速度2.5m/sに相当する浮力を与えており、20分間で気球は約3000m上昇しているから、平均化時間としてはやや長い印象を受ける。本研究で用いた観測事例数が少ないため、20分という平均化時間が同様な観測で常に風速差極小となるかどうか明らかにするには、事例数を増やしたさら

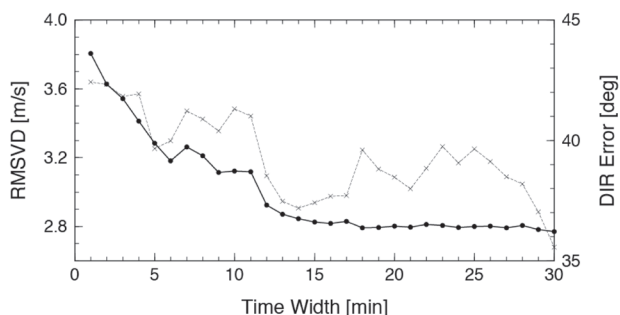


図8 DL 観測値の平均時間幅 (横軸) に対する $RMSVD$ (実線) および $(\overline{\Delta DIR})$ (破線) の変化

なる研究が必要である。また、今回のライダー観測による水平風の時間分解能は約1分であるから、図8の横軸は平均化に用いた最大サンプル数と読み替えることもできる。平均化時間が短いと適切な平均値 (期待値) を表すのに十分なサンプル数が確保できないため、 $RMSVD$ が大きくなっている可能性もある。

7. 考 察

図7に示した、今回の全観測における高度別風速・風向差の平均では、 $RMSVD$ で2~4 m/s、 $\overline{\Delta DIR}$ で20~70°であり、平均的には両観測に大きな差があることが示された。下層の高度300~800m (DLのレンジビン番号2~5) では特に差が大きく、 $RMSVD$ は3 m/s以上、 $\overline{\Delta DIR}$ は60°前後である。DLとゾンデを比較した星野・岩淵 (2013) では、同高度の $RMSVD$ は1.5~2 m/s、 $\overline{\Delta DIR}$ は15~25°程度であり、本研究の結果は特に下層でやや差が大きい結果となった。しかし、図4や図5で示されるように、両観測の差の大小には観測事例による違いが大きい。風速バイアスは個々の事例におけるデータのばらつきが大きい、午前の事例ではDLの方がやや過大であり、午後は逆にDLの方がやや過小となる傾向となった。風向バイアスについては、午前は大きくばらつきも大きい、午後の多くの事例はDLがパイバルに対してやや時計回りにずれるものの、その大きさは16方位における1方位分以内に収まっており両者の差は小さかった。

このような事例による違いは、何によってもたらされたと考えられるだろうか。図6で示したように、DLとパイバルの差は風速によってその傾向が異なり、特に風向の差は風速が4 m/s以上のときに小さかった。今回の観測期間では、時間とともに観測された気層の平均風速が強くなる傾向にあった。図5と図6の見かけが類似し

ていることからわかるように、風速4 m/s以上の特徴は、おおそ午後の事例の特徴を表している。すなわち、風速の大きさがDLとパイバルの差に影響を及ぼし、それが事例による差の大きさの違いとなっていることが示唆される。DLによる都市上空での視線方向速度の観測において、弱風時の日中には水平スケール0.5~1 km程度の網目状の風速分布を示す (網目状構造) 一方、強風時の日中には風速の強弱分布が吹走方向に沿って線状に分布するストリーク構造を示すことが明らかにされている (藤吉ほか2008; 八木ほか2013)。この事実は、弱風時には水平風の局所性が大きく、強風時には吹走方向に風の均質性が高いことを示唆する。このような流れの構造の違いが本研究における事例ごとの違いをもたらした可能性がある。また、図3からわかるように、午前の事例では気球は南東方向に流れており、一方で午後の事例では西北西~北方向に流れていた。図3にDLの走査範囲も示しているが、午前は風上側から、午後は風下側から走査していることになる。もし風上側と風下側でDLの観測精度に差が生じているとすれば、データを風向別に扱うなどの注意が必要となるが、今回の観測事例はサンプルが偏っており、風速による違いと風向による違いを切り分けることが困難である。また、図3は午前中の気球の軌跡がDL走査範囲に含まれないことや、午後においても気球は上空に行くほどDL走査範囲から水平距離が大きくなり外れていることを示しており、両データの水平方向の観測位置のずれが両データの差を大きくした可能性がある。これらの点を明らかにするためには、サンプル数を増やすために様々な卓越風向時の観測を蓄積することが必要である。また、DLを2台使用するなどして360°のPPI走査を行い、今回扱った180°走査に基づくデータと360°走査に基づくデータを比較して、両者の差を把握することも重要であろう。

DLとパイバルとの差の大小に影響したと思われるもう一つの要素として、DLデータを時間平均した際のサンプル数が挙げられる。図8が示すように、本研究ではサンプル数約20で $RMSVD$ が約2.8 m/sに収束したが、それでも図4を見ると事例や高度によっては個々のサンプルのばらつきが大きく、ばらつきが大きいほどDLとパイバルとの差が大きい傾向が見られた。大数の法則に従うとすればサンプル数が増えるほどその平均値は期待値に近づくはずであり、より高い時間分解能のDL観測を実施することで両観測の差を最小化できる可能性がある。

8. まとめ

2016年8月4日に埼玉県熊谷市の立正大学熊谷キャンパス内において、計10回のパイバル観測が実施された。本研究では、パイバル観測と同時に実施されたDLによるPPI観測より自動出力されたVAD水平風推定値に関して、パイバル観測値と比較することでその品質評価を行った。パイバルデータはDL観測高度に合わせて56秒移動平均を施すことで厚さ約140mの気層平均値を求め、DLデータはパイバル通過時刻を中心に10分間の観測値を平均してそれらと比較した。

観測事例全体で見れば、 $RMSVD$ で $2 \sim 4 \text{ m/s}$ 、 $\overline{\Delta DIR}$ で $20 \sim 70^\circ$ と両者の差は小さいとは言えない。しかし事例ごとの違いが大きく、午前の事例は両者の差が比較的大きい一方、午後の多くの事例については両者の差は小さくDLは十分な精度で平均的な風の鉛直分布を捉えていると考えられる。本研究の観測結果からは、風速が約 4 m/s より大きい事例では両観測の差が小さくなる傾向が見られ、差の大きさと風速との関係が示唆された。風速の違いによる流れの構造の違いが、両観測の風速差に影響を与えている可能性がある。そのほか、風向やDLデータのサンプル数との関係も示唆されたが、今回はそれらを実証するための十分なデータが得られていないため、さらなる研究が必要である。

謝 辞

環境システム学科の鈴木パーカー明日香助教および岩崎達哉、上田有佑、藤倉志帆の学部生3名には、パイバル観測に参加・協力頂いた。また、匿名の査読者には大変有益なコメントを頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 藤吉康志・山下和也・藤原忠誠・中西幹郎, 2008: ラージ・エディ・シミュレーションの気象への応用 (第9章). 気象研究ノート, **219**, 164pp.
- 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.
- 三菱電機株式会社, 2015: ドップラーライダー (LR-SID2GA) 取扱説明書. TM-P72516.
- 中川清隆・渡来 靖・榎原邦洋・浜田 崇・田中博春・榎原保志, 2009: ダブルトランシット法によって決定されるパイバル高度の特徴. 日本気象学会大会講演予稿集, **95**, 256.
- Netterville, D. D. J., and S. G. Djurfors, 1979: Controlling inherent uncertainties in double theodolite measurements. *Journal of Applied Meteorology*, **18**, 1371-1375.
- 佐々木華織・菅野洋光・横山克至・松島 大・森山真久・深堀協子・余 偉明, 2004: “清川ダシ” 吹走時に観測された強風域および風の鉛直構造の特徴. 天気, **51**, 881-894.
- Schaefer, J. T., and C. A. Doswell III, 1978: The inherent position errors in double-theodolite pibal measurements. *Journal of Applied Meteorology*, **17**, 911-915.
- 鈴木真一・前坂 剛・岩波 越, 2016: ドップラーライダー観測から解析された地表近くの風とラジオゾンデ観測との比較. 日本気象学会大会講演予稿集, **110**, 144.
- 高咲良規・吉崎正憲・渡来 靖・中川清隆・靄島徹也・武井祐興, 2016: 立正大学・熊谷キャンパスにおけるドップラーライダによる水平風の観測. 地球環境研究, **18**, 49-55.
- Thyer, N., 1962: Double theodolite pibal evaluation by computer. *Journal of Applied Meteorology*, **1**, 66-68.
- 八木綾子・有場次郎・稲垣厚至・神田 学・藤原忠誠・藤吉康志, 2013: ドップラーライダーによる都市上空の流れ分類. 土木学会論文集B 1 (水工学), **69**, I_1753-I_1758.

Quality evaluation of horizontal winds estimated by VAD method from single Doppler lidar —Comparison with pibal winds obtained by double theodolite method—

WATARAI Yasushi *, NAKAMURA Yusuke ** and AOKI Shota **

* Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

** Graduate Student, Graduate School of Geo-environmental Science, Rissho University

Abstract:

The simultaneous observation of horizontal wind profiles by the single Doppler lidar and pibal measurements was performed on August 4, 2016. In order to evaluate the quality of the wind estimated by VAD (Velocity Azimuth Display) method from the lidar, two kinds of wind data based on separate observations are compared each other. As a result, the difference of two data is rather large (2 – 4 m/s for a wind speed and 20 – 70° for a wind direction) on a whole. However, it is widely different by observation cases. Especially, two observed values are quite similar for the cases in the afternoon. The difference of two data is small when the wind speed is more than 4 m/s. This suggests that it depends upon the wind speed.

Key words: Doppler lidar, pilot balloon, double theodolite method, horizontal wind