

# 走査型ドップラーライダーに対する傾斜補正手法の提案および検証

中 村 祐 輔\*      渡 来      靖\*\*      中 川 清 隆\*\*

キーワード：ドップラーライダー、傾斜補正手法、大気境界層、熊谷市

## 1. はじめに

都市境界層の構造や高度を詳細に把握することは、日々の天気や大気汚染を理解・予測する上で極めて重要である (Beyrich, 1997)。近年、都市境界層の乱流構造や境界層高度の日変化がドップラーライダー（以降、DL）等のリモートセンシング機器により捉えられている（例えば、Angevine et al., 2003；Davies et al., 2007；八木ほか, 2015）。ただし既存研究の多くは、1つの都市に対して1地点の観測データのみを使用して特徴を議論しているものがほとんどである。しかしながら、Barlow (2014) は、都市境界層が局所的な変化（熱源や都市構造）に対して極めて敏感であると指摘している。そのため、1地点のデータのみで都市全体における境界層の特徴を議論することは困難である。そのような中で、Pal et al. (2012) は、フランスのパリにおいてライダーおよびシーロメーターを用いた自動車による移動観測を実施した。その結果、境界層の高度が郊外よりも都市で高いことを示した。さらに、夜間の都市境界層高度には空間的な変動が非常に大きく、その変動が都市ヒートアイランドの分布に対応していることを示唆した。このように、都市境界層は空間的に極めて複雑な構造を有しており、その構造を把握する上でリモートセンシング機器による移動観測手法は非常に有効である。しかしながら、Pal et al. (2012) の移動観測により計測されたのは境界層高度のみであり、3次元風までを含めた詳細な都市境界層構造が実測された例は皆無である。これらのことから、詳細な都市境界層構造を明らかにするためには、3次元風が計測可能なDLによる移動観測手法を確立させることが重要である。

DL移動観測には、機器の傾斜に起因する計測誤差が含まれるため、その補正を行なう必要がある。これまでに、浮体式DLによる洋上風況の連続観測の際にDLの動揺補正手法の提案および検証が実施されている (Wolken-Möhlmann et al., 2010；若林ほか, 2014；Tiana-Alsina et al., 2015；山口・石原, 2016)。例えばTiana-Alsina et al. (2015) は、海洋上のブイに設置されたDLの観測値に対して機械的な動揺補正を行ない、そのデータを固定DLと比較することで補正手法の検証を実施した。その結果、平均風速について補正を行なわない場合より補正を行なった方が両者の差が小さくなることを示した。

このように、機器の水平が正しく調整されず機器が傾斜している場合、観測値は傾斜による影響を強く受ける。しかしながら、既存研究における補正手法は非走査型DLに対するものがほとんどであり、走査型DLについて考慮した研究例はない。さらに、風速の補正が主目的であったため、風向に関する検証が実施されていない場合が多い。そこで本研究では、立正大学が保有する走査型DLの3次元風向・風速に対する傾斜補正手法を提案する。その上で、補正された3次元風向・風速を定点観測されたDLと比較することで提案した補正手法の検証を実施する。また、傾斜補正手法を厳密に検証するためには、同地点において水平に設置されたDLと傾斜状態で設置されたDLの2台を並べて観測することが理想的である。しかしながら、本研究はDLの移動観測手法の確立を最終目的としているため、実際の移動DLデータを検証することも目的の一つとする。そのため、水平に設置されたDLとほぼ同じ空間における風を、移動観測プラットフォーム上に設置されたもう1台のDLを用いて異なる方位、傾斜状態で観測し、補正の効果を検証することとした。

\* 立正大学大学院・地球環境科学研究科・博士後期課程

\*\* 立正大学地球環境科学部

## 2. DLの計測原理と補正手法

### 2.1 DLの計測原理

DLは、近赤外のパルスレーザーを大気中に向けて発射して、浮遊するエアロゾルからの後方散乱光を受信し、エアロゾルの移動方向や速度を風向風速として計測する機器である。ただし、この測定原理のため、エアロゾルが大気中に十分に存在していない場合や、より下層に多量のエアロゾルが存在する場合には、受信される後方散乱強度が小さくなる。そのため、一般に下層よりもエアロゾル量が少ない上空ほどデータの検出率は低下する。

表1は、本研究で使用する3次元コヒーレントDL（三菱電機：LR-S1D2GA）の主な仕様を示す。LR-S1D2GAは走査型ライダーで、水平方向に $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 、垂直方向に $-5^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の走査が可能である。また、LR-S1D2GAは観測範囲を60～630m（パルス幅：200ns）、75～1500m（500ns）、150～3000m（1000ns）から設定できる。観測範囲を広げる場合、遠方に存在するエアロゾルから反射された信号を受信する必要がある。ただし、遠方になるほど受信信号は弱まるため、解析に十分なデータを得るためにはレーザー出力を高めるか送信パルス幅を広げなければならない。LR-S1D2GAは、パルス幅を調整することで観測範囲を広くしているが、パルス幅の増加にしたがって距離分解能が粗くなる。

LR-S1D2GAでは、本体装置内蔵のソフトウェアにより、高仰角PPI操作を行なった際に1回の観測ごとにVAD（Velocity Azimuth Display）法によって3次元風速・風向を算出している。VAD法では、一定仰角で $360^{\circ}$  PPI走査した際に走査円上の風が一様であるとす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（Browning and Wexler, 1968）。このように、本来のVAD法では $360^{\circ}$ 走査したドップラー速度から水平風を求める。しかしながら、LR-S1D2GAは1台につき最大で $180^{\circ}$ までしか水平走査できないため、 $180^{\circ}$ 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）。また、LR-S1D2GAでは、データの品質管理のため、測定値の信号対雑音比（以降、SNR）が7dB以下の場合にはドップラー風速を出力しない。本研究では、本体装置内蔵ソフトウェアによって出力されたデータ（以降、VAD 3次元風）に対する傾斜補正を検討することとする。

### 2.2 VAD 3次元風に対する傾斜補正手法

DL観測において、機器の水平が正しく調整されず機器が傾斜している場合の、DL観測風（VAD 3次元風）の補正について検討する。図1のように、3次元（局所）直交座標（右手系） $xyz$ をとり、 $xy$ 平面を真の水平面とし、 $x$ 軸を東向き、 $y$ 軸を北向き、 $z$ 軸を鉛直上向きとする（黒）。また、DLの座標を $x'y'z'$ とし、 $x'y'$ 平面をDLの水平面とする（赤）。両座標系の原点 $O$ は共通とする。直線 $l_1, l_2, l_3, l_4$ は全て原点 $O$ を通り、直線 $l_1$ は $x'y'$ 平面上、 $l_2, l_3, l_4$ は $xy$ 平面上にある。また、直線 $l_1, l_2$ は $z$ 軸と $z'$ 軸のなす平面上にある。DL水平面の真の水平面からの傾きについては、 $x'$ 軸の傾斜角 $\theta_{x'}$ と $y'$ 軸の傾斜角 $\theta_{y'}$ の2角が既知であるとする。

表1 本研究で使用したDL（LR-S1D2GA）の主な仕様

レーザー光波長	1.55 $\mu$ m帯		
距離分解能	30m	75m	150m
観測範囲	60～630m	75～1,500m	150～3,000m
送信光パルス幅	200ns	500ns	1,000ns
レンジピン数	20（0～19）		
ドップラー速度範囲	-30～+30m/s		
照射方式	走査方式		
方位角走査範囲	$-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$		
仰角走査範囲	$-5^{\circ} \sim +90^{\circ}$		
駆動速度	1.0～20.0 / s（水平方向） 1.0～10.0 / s（垂直方向）		
走査パターン	POINTING, PPI, RHI, VPPI, VRHI		

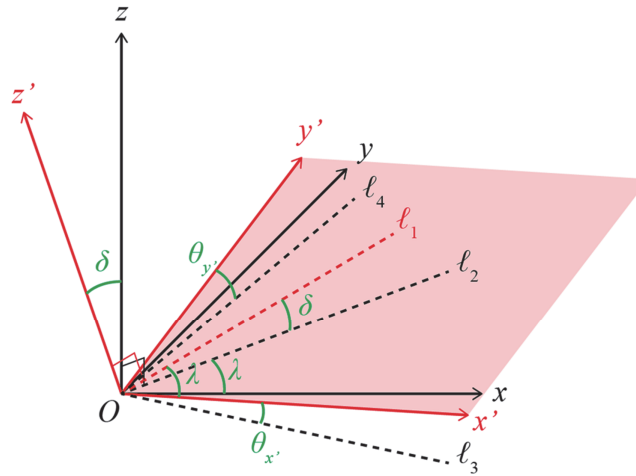


図1 局所直交座標系xyzとライダー座標系x'y'z'との関係を示す模式図

まず、 $x'y'z'$ 系から $xyz$ 系への座標変換を考える。ここで、 $xyz$ 系において $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸方向の単位ベクトルをそれぞれ $i$ 、 $j$ 、 $k$ 、 $x'y'z'$ 系において $x'$ 、 $y'$ 、 $z'$ 軸方向の単位ベクトルをそれぞれ $i'$ 、 $j'$ 、 $k'$ とする。この座標変換は、 $z'$ 軸から $z$ 軸に角度 $\delta$ 回転する変換と集約できる。ただし、 $z'$ 軸と $z$ 軸とのなす平面と真の水平面( $xy$ 平面)との交線( $l_2$ )は一般的には $x$ 軸とは一致しない(両者のなす角 $\lambda$ がゼロではない)。そこで、この座標変換を以下の3ステップに分けて表現する。すなわち、(1)  $z'$ 軸を回転軸として角度 $\lambda$ ぶん回転( $x' \rightarrow l_1$ )、(2)  $y$ 軸を回転軸として角度 $\delta$ ぶん回転( $l_1 \rightarrow l_2$ 、 $z' \rightarrow z$ )、(3)  $z$ 軸を回転軸として角度 $-\lambda$ ぶん回転( $l_2 \rightarrow x$ )。これらの変換行列をそれぞれ $A_1, A_2, A_3$ とすると、以下のように表される。

$$A_1 = \begin{pmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} \cos \delta & 0 & \sin \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \delta & 0 & \cos \delta \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

$xyz$ 系、 $x'y'z'$ 系での3次元風ベクトルをそれぞれ $V = ui + vj + wk$ 、 $V' = u'i' + v'j' + w'k'$ とすると、上記の座標変換は

$$V = A_3 A_2 A_1 V' \tag{4}$$

と表される。合成変換 $A_1 A_2 A_3$ は

$$\begin{aligned} A_3 A_2 A_1 &= A_3 (A_2 A_1) \\ &= \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} \cos \delta & 0 & \sin \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \delta & 0 & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda \cos \delta & \sin \lambda \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \lambda \sin \delta & -\sin \lambda \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos^2 \lambda \cos \delta + \sin^2 \lambda & \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) & \cos \lambda \sin \delta \\ \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) & \sin^2 \lambda \cos \delta + \cos^2 \lambda & \sin \lambda \sin \delta \\ -\cos \lambda \sin \delta & -\sin \lambda \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{5}$$

となるから、式 (4) (5) より

$$\begin{cases} u = u'(\cos^2 \lambda \cos \delta + \sin^2 \lambda) + v' \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) + w' \cos \lambda \sin \delta & (6) \\ v = u' \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) + v'(\sin^2 \lambda \cos \delta + \cos^2 \lambda) + w' \sin \lambda \sin \delta & (7) \\ w = -u' \cos \lambda \sin \delta - v' \sin \lambda \sin \delta + w' \cos \delta & (8) \end{cases}$$

となる。

以上のように、式 (6)~(8) にDLで観測された風速各成分 $u', v', w'$ を与えることで水平風 $u, v$ および鉛直風 $w$ を求めることができるが、2つの角 $\lambda, \delta$ を求める必要がある。上述の座標変換より、 $x'$ 軸方向の単位ベクトル $\mathbf{i}'$ は $xyz$ 系では

$$\mathbf{i}' = \mathbf{i}(\cos^2 \lambda \cos \delta + \sin^2 \lambda) + \mathbf{j} \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) - \mathbf{k} \cos \lambda \sin \delta \quad (9)$$

と表せる。このベクトル $\mathbf{i}'$ と $\mathbf{i}'$ を $xy$ 平面上に投影したベクトル $\mathbf{i}'_{xy}$

$$\mathbf{i}'_{xy} = \mathbf{i}(\cos^2 \lambda \cos \delta + \sin^2 \lambda) + \mathbf{j} \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) \quad (10)$$

とのなす角が $\theta_{x'}$ であるから、内積の関係より

$$\cos \theta_{x'} = \frac{\mathbf{i}' \cdot \mathbf{i}'_{xy}}{|\mathbf{i}'_{xy}|} = \sqrt{\cos^2 \lambda \cos^2 \delta + \sin^2 \lambda} \quad (11)$$

また、外積の関係より

$$\sin \theta_{x'} = \frac{|\mathbf{i}' \times \mathbf{i}'_{xy}|}{|\mathbf{i}'_{xy}|} = \cos \lambda \sin \delta \quad (12)$$

となる。一方、 $y'$ 軸方向の単位ベクトル $\mathbf{j}'$ は $xyz$ 系では

$$\mathbf{j}' = \mathbf{i} \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) + \mathbf{j}(\sin^2 \lambda \cos \delta + \cos^2 \lambda) - \mathbf{k} \sin \lambda \sin \delta \quad (13)$$

となり、これと $\mathbf{j}'$ を $xy$ 平面上に投影したベクトル $\mathbf{j}'_{xy}$

$$\mathbf{j}'_{xy} = \mathbf{i} \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) + \mathbf{j}(\sin^2 \lambda \cos \delta + \cos^2 \lambda) \quad (14)$$

とのなす角が $\theta_{y'}$ であるから、内積の関係より

$$\cos \theta_{y'} = \frac{\mathbf{j}' \cdot \mathbf{j}'_{xy}}{|\mathbf{j}'_{xy}|} = \sqrt{\sin^2 \lambda \cos^2 \delta + \cos^2 \lambda} \quad (15)$$

また、外積の関係より

$$\sin \theta_{y'} = \frac{|\mathbf{j}' \times \mathbf{j}'_{xy}|}{|\mathbf{j}'_{xy}|} = \sin \lambda \sin \delta \quad (16)$$

式 (16) を式 (12) で割ると、

$$\tan \lambda = \frac{\sin \theta_{y'}}{\sin \theta_{x'}} \quad (17)$$

となるから、 $\lambda$ は

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta_{y'}}{\sin \theta_{x'}} \right) \quad (18)$$



により求まる。また、式 (11)、(15) の両辺を2乗して足し合わせると、

$$\cos^2 \theta_{x'} + \cos^2 \theta_{y'} = \cos^2 \delta + 1 \quad (19)$$

さらに、式 (12)、(16) の両辺を2乗して足し合わせると、

$$\sin^2 \theta_{x'} + \sin^2 \theta_{y'} = \sin^2 \delta \quad (20)$$

となるから、式 (19)、(20) より、

$$\tan \delta = \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_{x'} + \sin^2 \theta_{y'}}{\cos^2 \theta_{x'} + \cos^2 \theta_{y'} - 1}} = \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_{x'} + \sin^2 \theta_{y'}}{\cos^2 \theta_{x'} - \sin^2 \theta_{y'}}} \quad (21)$$

したがって、 $\delta$ は

$$\delta = \tan^{-1} \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_{x'} + \sin^2 \theta_{y'}}{\cos^2 \theta_{x'} - \sin^2 \theta_{y'}}} \quad (22)$$

により求まる。

図2は、 $x'$ 軸、 $y'$ 軸の水平面に対する傾斜角 $\theta_{x'}$ 、 $\theta_{y'}$ と、座標変換時の方位角および仰角方向の回転角 $\lambda$ 、 $\delta$ との関係を示す(単位はすべて $^\circ$ )。取り得る範囲は白背景の矩形領域である。

### 3. 検証方法および結果

#### 3.1 観測の概要

2018年1月23日から熊谷市役所において、DLを用いた都市境界層の連続定点観測が実施されている。そこで本研究では、2018年7月23日に熊谷市役所の周辺において自動車による移動DL観測を実施し、観測データに対して2.2節において提案した傾斜補正を施した。その上で、定点観測と移動観測の結果を比較し傾斜補正手法を検証した。

移動観測は、DLを軽トラックの荷台に設置し実施した。図3に移動観測車を示す。設置の際には、軽トラックの荷台にDLを直接固定することが困難であったため、DL固定用の木柵を作成した。そして、DLを固定した木柵をゴムロープおよび突っ張り棒を用いて荷台上に固定した(図3 a)。また、移動によるDLへの振動を和らげるために木柵と荷台の間に防振ゴムを敷いた。表2は、本研究におけるDLの主な観測設定を示す。観測範囲は、75~1500mに設定した。観測モードはVPPI走査とし、ビーム仰角 $69^\circ$ および $90^\circ$ の2仰角での観測を交互に実施した。各高度における観測データの平均間隔は約45秒である。DLは視線方向風速およびSNRを測定した。その他に、2.2節で示した

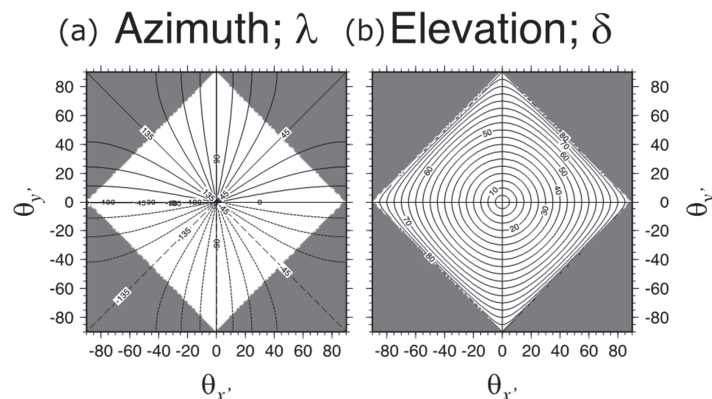


図2 水平面からの傾斜角 $\theta_{x'}$ 、 $\theta_{y'}$ と座標変換時の方位角 (a)、仰角 (b) 方向の回転角 $\lambda$ 、 $\delta$ との関係

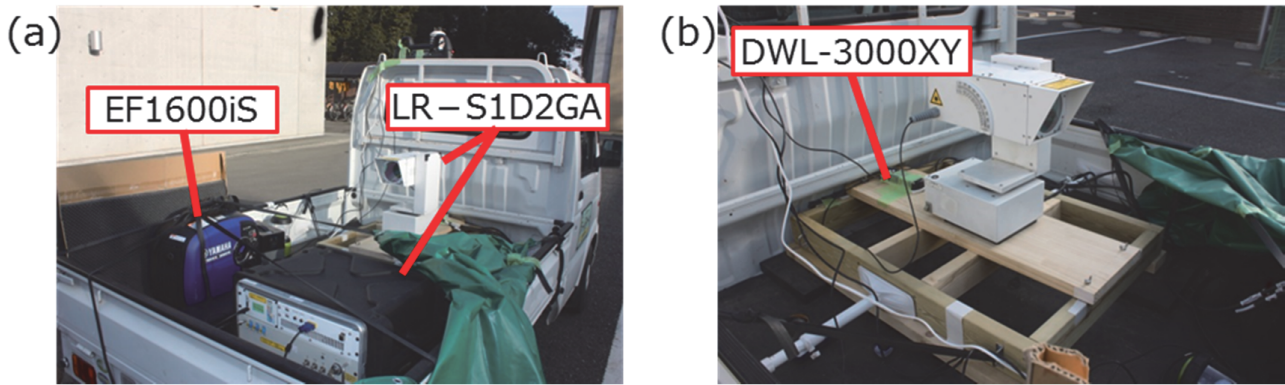


図3 本研究で用いたDLの移動観測車。(a)は荷台の全景、(b)はDL固定用の木枠を示す

表2 本研究におけるDLの主な観測設定

距離分解能	75m
観測範囲	75~1,500m
観測モード	PPI（固定観測）、VPPI（移動観測）
ビーム仰角	69°, 90°
方位角走査速度	10.0° / s
パルス積分回数	8,000

$x'$ 軸の傾斜角 $\theta_{x'}$ および $y'$ 軸の傾斜角 $\theta_{y'}$ を得るために、デジタル水準器（DWL-3000XY：Digi-Pas社製）をDLが固定されている木枠上に設置し（図3 b）、傾斜角を1秒間隔で測定した。

本研究で使用したDLは走査型DLであるため、一つの仰角をスキャンし、風向・風速を算出するのに数十秒程度の時間を要する。そのため、一回のスキャン中においても、自動車の移動速度、DLの方向や傾斜が大きく異なってしまう。その結果、一回のスキャンデータをVAD法に反映し、本研究で示した傾斜補正手法により補正することは困難である。さらに、本研究ではDLが傾斜した際のデータに補正を施し、その結果を検証することが目的である。これらのことから、検証は自動車が停車中のデータのみを使用することとし、熊谷市役所から半径150m範囲内の計4地点においてそれぞれ約10分間停車観測し、その補正結果を固定観測と比較することとした。図4は観測位置を示す。4地点の停車観測を合わせた時間は、各地点間の移動も含めて約1時間である。その観測を、7月23日の13時04分～14時16分（No.1）、16時27分～17時36分（No.2）、21時36分～22時36分（No.3）の計3回実施した。またLR-S1D2GAは、ソフトウェア起動時におけるセンサー正面の方位を方位角0°に設定する。そのため、各停車観測時におけるセンサー正面の方位を、コンパスグラス（HB-7M：石神井計器製作所）により計測し、データ解析時に補正した。



図4 観測位置。赤丸が移動DL、赤星が固定DLを示す

また、移動観測と比較するための固定観測は、観測モードがPPI走査、各高度における観測データの平均間隔が約60秒である以外は、移動観測と同様の設定とした(表2)。さらに、地上気象観測データとして熊谷市役所から西北西方向へ約800mの位置にある熊谷地方気象台の露場データを使用した。

### 3.2 観測対象日の天気概況

観測を実施した2018年7月23日の9時における地上天気図を図5に示す。7月23日は全国的に高気圧に覆われ、気象庁の気温観測地点242地点で日最高気温35℃以上の猛暑日となった。さらに、熊谷地方気象台においては日本国内観測史上1位の41.1℃が記録された。熊谷地方気象台における気象要素の時系列を図6に示す。7月23日は降水がなく、日積算日照時間は13.4時間であった(図6 a)。気温は日出頃から上昇し、14時16時に日最高気温が出現した。その後、日没時刻まで急激に低下し、日最低気温が出現する日出前まで徐々に低下した。平均気温は33.5℃(8月の平年値は26.8℃)であった。風速は時間とともに徐々に大きくなっていくが、正午過ぎを境に急激に低下した(図6 b)。また、風向は14時頃まで西～北西寄りであったが、その時刻を境に急変し15時以降は東～南寄りの風が吹いた。日最大風速は、12時9分に7.2m/s(北西)が記録された。

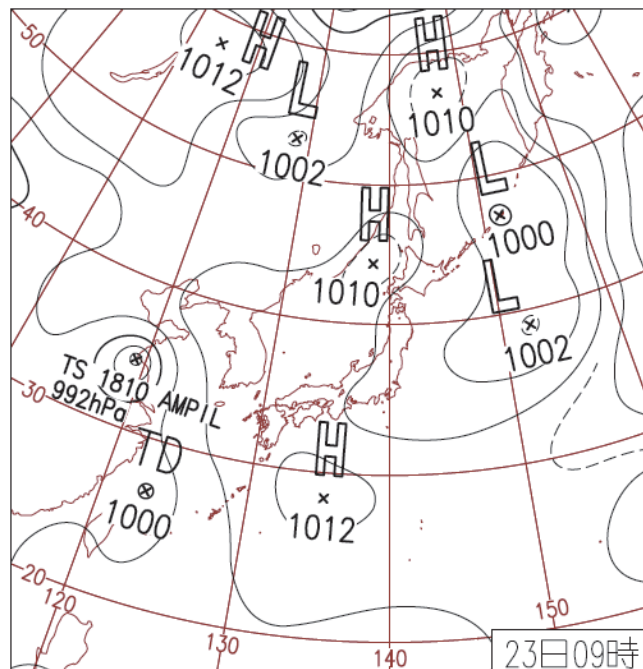


図5 2018年7月23日9時における地上天気図(気象庁HP「日々の天気図」より)

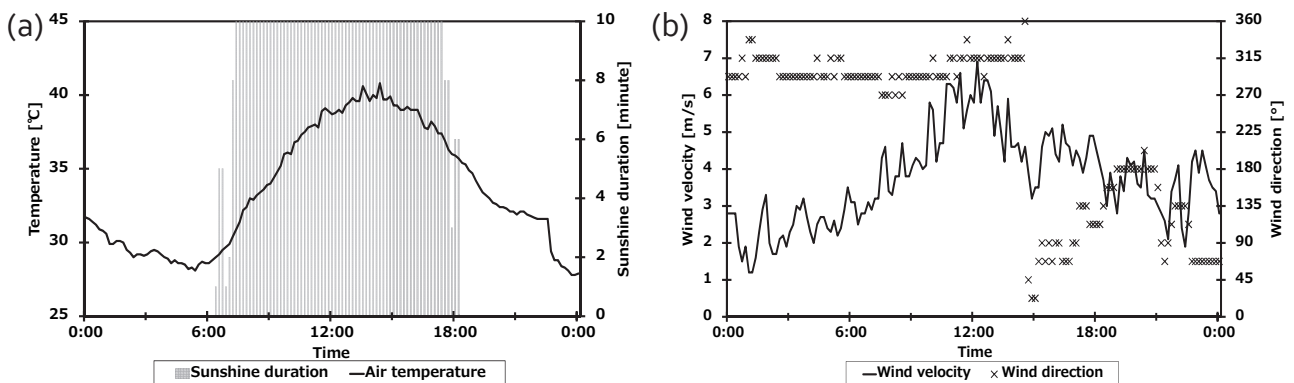


図6 2018年7月23日における(a)気温および日照時間、(b)風向および風速の日変化。使用データは熊谷地方気象台の10分値



### 3.3 固定DLの観測結果

本節では、固定DL観測によって得られた結果を示す。図7は、熊谷市役所に設置された固定DLの観測により得られた、7月23日0時から翌日0時における風およびSNRの時間-高度断面図を示す。風およびSNRは前30分間のデータを平均した値を使用している。VAD法によって風速が出力されるSNR7dB以上の領域は、0時から6時において地上から高度300m前後であるが日出とともに上昇する。この結果は、日出とともに熱的混合が生じ、混合層の発達に伴ってSNRが上層へ拡散する過程を捉えているものと推測される。ただし、正午過ぎから14時頃の時間帯において、地上から高度600m前後の層のSNRが急激に低下する。この時間帯は、DLの移動観測 (No.1) が実施された時刻である。その後、SNR7dB以上の領域は18時前後に高度1000mに達し、それ以降は徐々に低下する傾向を示す。

出力された水平風は、0時から正午過ぎにおいて北西寄りの風向を示す (図7 a)。また、水平風速は8時頃から大きくなり、13時00分の高度350mにおいて日最大風速14.7m/s (北西) が示される。14時以降は風向が東～南寄りへ急変し、それ以前と比較して風速も非常に小さくなる。0時から6時頃における地上から高度300m前後までの鉛直風は、風速が非常に小さく ( $\pm 0.1$ m/s前後)、高度によって正負も様々である (図7 b)。ただし、日出以降は上昇流傾向が強くなり、風速も大きくなる。この時刻は、SNRが上層へ拡散する時刻と整合的である。正午から13時頃における高度400m以下では、やや強い下降流傾向が示される。ただし、14時以降は地上から上層まで概ね上昇流傾向が示されている。

### 3.4 移動DLの観測結果

この節では、移動DLの3次元風に対して2.2節で提案した傾斜補正を施した結果を示し、補正前後の値を比較する。ただし、3.3節で示したように移動DL観測のNo.1が実施された時間帯はSNRが非常に小さくなり、VAD 3次元風はほとんど検出されなかった。そのため、これ以降はNo.2およびNo.3の観測結果のみを使用することとした。表3は、No.2およびNo.3観測における各地点の計測時間、コンパスグラスにより計測されたDL方位角 $0^\circ$ および傾斜角を示す。地点④は、その他地点と比較して急斜面であったため、自動車を斜面に対して上向き (地点④I) と下向き (地点④II) に停車させて観測した。ちなみに、今回の移動観測では、DLが最大で $3.74^\circ$ 傾斜していた。

図8は、移動DLにより観測されたVAD 3次元風の鉛直プロファイルを示す。ここでは、No.2およびNo.3の時間帯において、それぞれ4地点で観測された風を平均した。また、各高度のVAD 3次元風に対して傾斜補正前の値と補正後の値をそれぞれ示した。No.2の時間帯における傾斜補正後の水平風速は、地上から高度600mまでが約7m/sで一定の値を示し、それより上層では高度とともに小さくなった。No.2における傾斜補正後の水平風向は、地上から上層まで $100^\circ \sim 130^\circ$ ではほぼ一定の値を示す。No.3の時間帯における傾斜補正後の水平風速は、地上から上層へ向けて徐々に値が大きくなり、高度700mで最大値7.5m/sを示す。それより上層では高度とともに小さくなった。No.3における傾斜補正後の水平風向は、地上から上層まで $140^\circ \sim 160^\circ$ ではほぼ一定の値を示す。No.2の時間帯における鉛直風は、

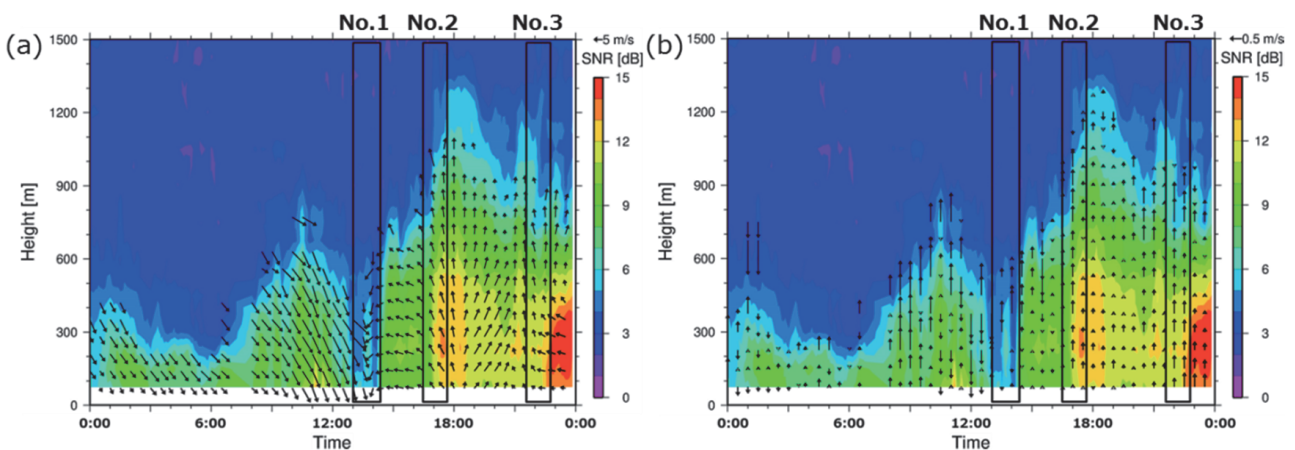


図7 固定DLにより得られた2018年7月23日における風およびSNRの時間-高度断面図。(a) が水平風、(b) が鉛直風を示す

表3 No.2 (a) およびNo.3 (b) の時間帯における各地点の観測詳細

(a)	地点①	地点②	地点③	地点④ I	地点④ II
計測時間	16 : 27~16 : 38	16 : 40~16 : 51	16 : 52~17 : 02	17 : 03~17 : 13	17 : 03~17 : 13
DL方位角 $0^\circ$	$207^\circ$	$264^\circ$	$227^\circ$	$28^\circ$	$199^\circ$
傾斜角 x	$-0.05^\circ$	$-0.04^\circ$	$-0.18^\circ$	$-0.82^\circ$	$+1.03^\circ$
傾斜角 y	$-0.19^\circ$	$-1.85^\circ$	$-1.18^\circ$	$+2.08^\circ$	$-3.07^\circ$

(b)	地点①	地点②	地点③	地点④ I	地点④ II
計測時間	21 : 36~21 : 46	21 : 50~22 : 03	22 : 05~22 : 15	22 : 16~22 : 25	22 : 26~22 : 36
DL方位角 $0^\circ$	$208^\circ$	$190^\circ$	$7^\circ$	$37^\circ$	$197^\circ$
傾斜角 x	$+0.03^\circ$	$-0.28^\circ$	$-0.36^\circ$	$-0.57^\circ$	$+0.61^\circ$
傾斜角 y	$-0.04^\circ$	$-0.66^\circ$	$-0.30^\circ$	$+1.91^\circ$	$-3.74^\circ$

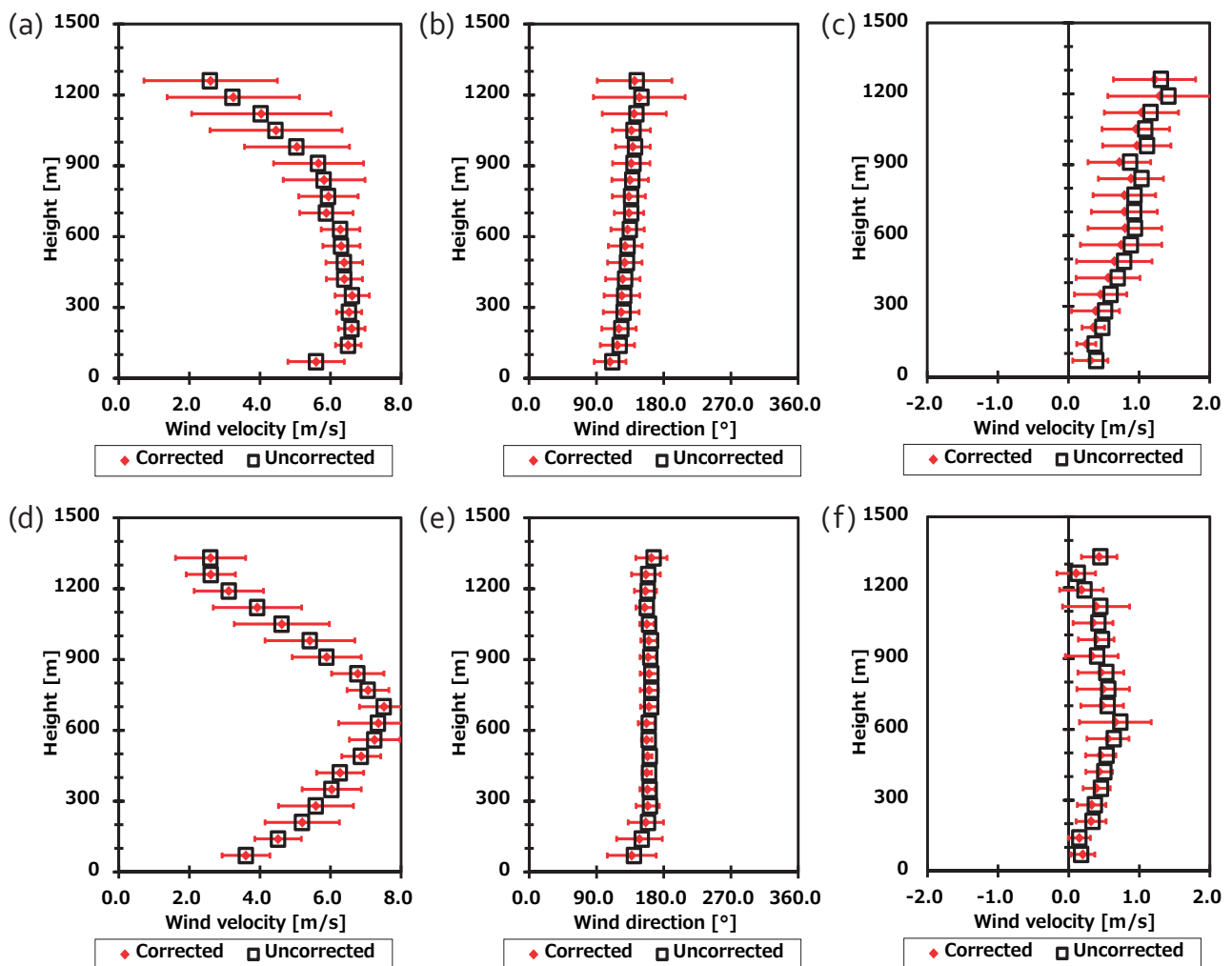


図8 No.2 (上段) およびNo.3 (下段) の時間帯における移動DLにより得られたVAD3次元風の鉛直プロファイル。(a) (d) が水平風速、(b) (e) が水平風向、(c) (f) が鉛直風を示す。また、エラーバーは各時刻の4地点における各高度の標準偏差を示す

地上から上層まで上昇流傾向を示し、その傾向は地上から上層へ徐々に強まっている。No.3の時間帯においても地上から上層まで上昇流傾向であるが、高度600m前後に極大値が示される。

ここで、傾斜補正前後の値を比較する。水平風の鉛直プロファイルの特徴は、No.2およびNo.3の時間帯ともに傾斜補正前後で違いはない。両者の差の絶対値は全高度の平均値でNo.2が水平風速0.01m/s、水平風向 $3.0^\circ$ 、No.3が水平



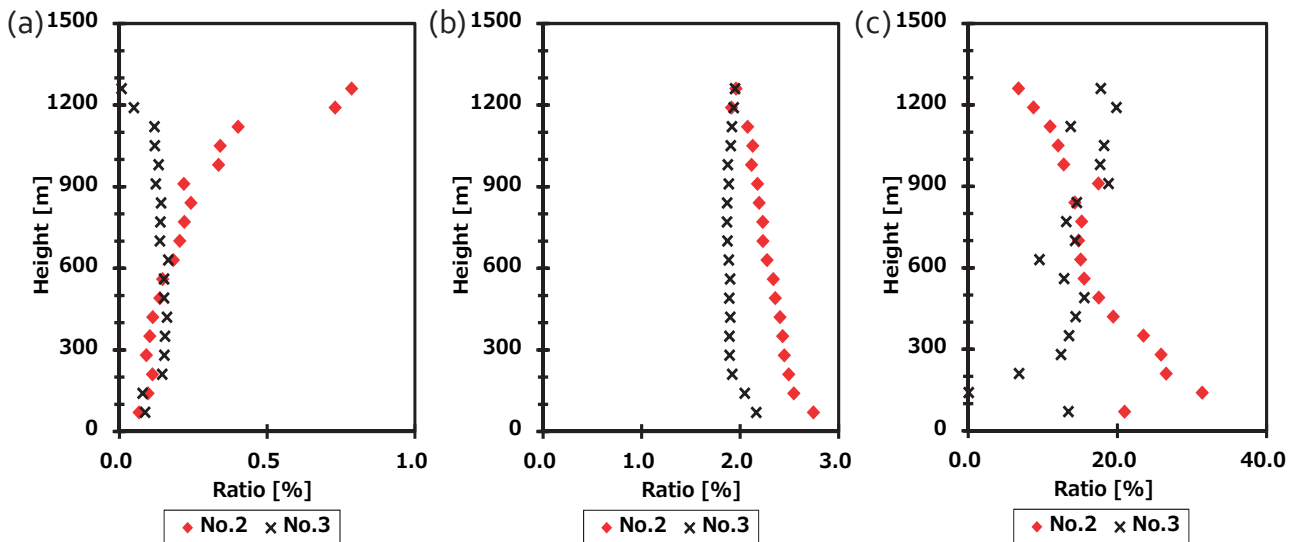


図9 各高度における観測値の絶対値に対する傾斜補正前後の差の絶対値の割合。(a)が水平風速、(b)が水平風向、(c)が鉛直風速を示す

風速0.06m/s、水平風向3.0°であった。鉛直風に関しても、傾斜補正前後で鉛直プロファイルの特徴に大きな違いは生じていない。しかしながら、両者の差の絶対値は水平風と比較して大きく、全高度の平均値でNo.2が0.15m/s、No.3が0.06m/sを示す。

続いて、補正前後の差が観測値に対してどの程度の割合を占めるのかを検討する。図9は各高度における観測値の絶対値に対する傾斜補正前後の差の絶対値の割合を示す。水平風速および風向に対する傾斜補正の割合は非常に小さく、風速が1.0%以下、風向が3.0%以下を示した。一方、鉛直風に対する傾斜補正の割合は相対的に大きく、平均で15.1%を示す。特にNo.2の時間帯における高度150mの割合は大きく、31.1%を示す。

以上のように、傾斜補正前後において水平風の観測値は大きく変化しないことが示された。一方、鉛直風の値は観測値に対して最大30%の変化が生じることが示された。

### 3.5 移動および固定DLの比較

最後に、移動および固定DLの観測値を比較することで、本研究で提案した傾斜補正手法を検証する。ただし、ここではNo.2およびNo.3の観測において、VAD 3次元風速が十分に出力された地上～高度650mまでの値のみを使用した。図10は、各高度における移動DLのVAD 3次元風から固定DLの値を引いた差を示す。ここでは、No.2およびNo.3の結果を平均した。また、図8と同様に移動DLのVAD 3次元風は傾斜補正前後の値を用いた結果をそれぞれ示した。傾斜補正後の水平風速における移動および固定DLの差の絶対値は、全高度の平均値で0.3m/sを示した。この値は、傾斜補正前との差と比較して0.1m/s小さい。また、高度別では高度75mで最も大きいもの (+0.9m/s)、上層へ向かうにつれて差が小さくなる傾向が示された。傾斜補正後の水平風向における移動および固定DLの差の絶対値は、全高度の平均値で13.1°を示した。この値は、傾斜補正前との差と比較して0.1°差が小さい。また、高度別の値に違いは少なく、差の鉛直プロファイルに大きな特徴は認められない。一方、傾斜補正後の鉛直風速における移動および固定DLの差の絶対値は、全高度の平均値で0.2m/sを示した。この値は、傾斜補正前との差と比較して0.1m/s小さい。高度別では上層へ向かうほど差が大きくなる傾向が示された。さらに、高度150mの値は傾斜補正をすることにより、差の正負が入れ替わることが示された。

ここで、移動DLおよび固定DLの間に差が生じた要因について考察する。水平風速は、地上付近のみに約1 m/sの風速差が生じていた。これは、固定DLを設置した場所が熊谷市役所と隣接していたため、風速が弱化したものと推測される。特に、南側は30m程度の建物が建っており、その影響を受けた可能性が高い。これは、風向別で解析することで検証できるが、本研究で比較された時間帯は風向が東～南に偏っていたため、本観測のデータのみでの検証は困難である。

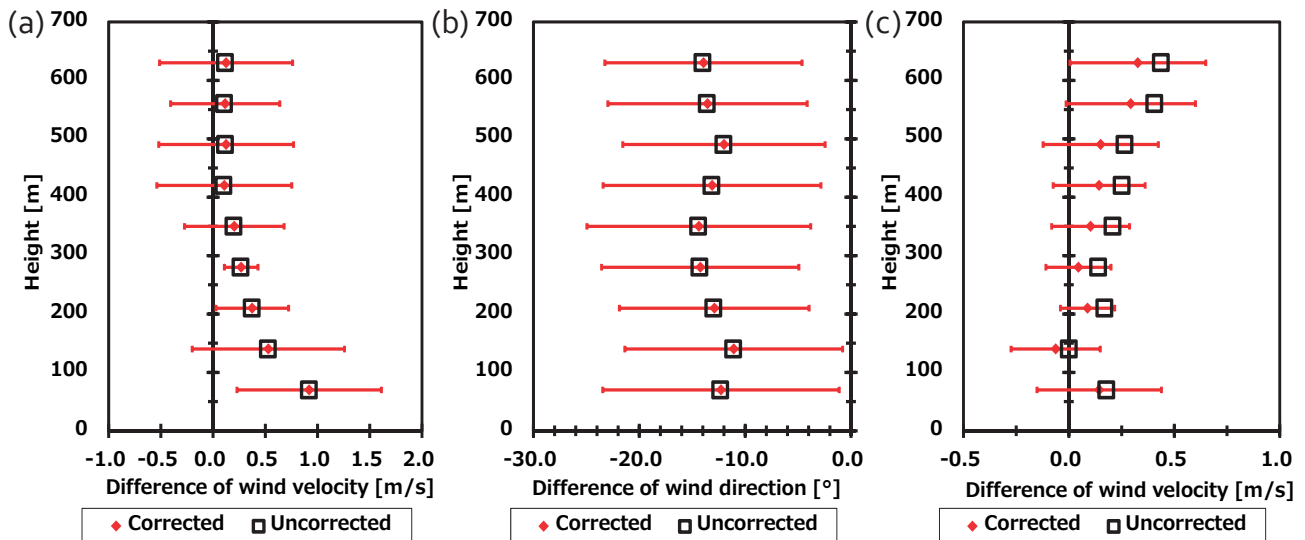


図10 各高度における移動DLのVAD3次元風から固定DLの値を引いた差。(a)が水平風速、(b)が水平風向、(c)が鉛直風速を示す。また、エラーバーは各時刻の4地点における各高度の標準偏差を示す

以上のように、移動DLの3次元風に本研究で提案した傾斜補正手法を施すことによって、固定DLの観測値との差が小さくなることが示された。特に、鉛直風速に対しては、観測値に対する補正值の割合が大きいことが示唆された。このことから、本研究で提案した傾斜補正手法の有用性が検証された。ただし、移動DLと固定DLの差には高度別に違いが生じていた。この点については今後、比較観測の事例を増やし風向別の解析を実施することで、検証を行っていく。

#### 4. まとめ

本研究では、走査型DLに対する傾斜補正手法を提案した。その上で、補正された3次元風速・風向を定点観測されたDLと比較することで提案した補正手法の検証を実施した。

固定DLと移動DLを比較した結果、VAD法によって算出された3次元風に傾斜補正を施すことによって両者の差が小さくなり、移動DLの値が固定DLに近くなることが示された。このことから、本研究で提案した傾斜補正手法の有用性が検証された。さらに、傾斜補正による補正值は、水平風の観測値に対しての割合は小さいが、鉛直風の観測値に対しては最大30%の割合を占めることが示された。

ただし、移動DLと固定DLの間には、低高度の観測値について周辺環境の違いが原因と推測される差異が発生してしまった。そのため、今後は同地点において水平に設置されたDLと傾斜状態で設置されたDLの2台を並べて観測する必要があると考えられる。

#### 謝辞

本研究は、熊谷市の「めざせ！暑さ対策研究日本一支援事業」の支援を受けて実施された。

#### 参考文献

- Angevine, W. M., White, A. B., Senff, C. J., Trainer, M., Banta, R. M., and Ayoub, M. A., 2003 : Urban-rural contrasts in mixing height and cloudiness over Nashville in 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **108** (D3), 4092, doi : 1029/2001J0001061.
- Barlow, J. F., 2014 : Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, **10**, 216-240.
- Beyrich, F., 1997 : Mixing height estimation from sodar data - a critical discussion. *Atmospheric Environment*, **31**, 3941-3953.
- Browning, K. A., and Wexler, R., 1968 : The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, **7**, 105-113.

- Davies, F., Middleton, D. R., and Bozier, K. E., 2007 : Urban air pollution modelling and measurements of boundary layer height. *Atmospheric Environment*, **41**, 4040-4049.
- 三菱電機株式会社, 2015: ドップラーライダー（LR-S1D2GA）取扱説明書. TM-P72516.
- Pal, S., Xueref-Remy, I., Ammoura, L., Chazette, P., Gibert, F., Royer, P., Dieudonne, E., Dupont, J.-C., Haeffelin, M., Lac, C., Lopez, M., Morille, Y., Ravetta, F., 2012 : Spatio-temporal variability of the atmospheric boundary layer depth over the Paris agglomeration: An assessment of the impact of the urban heat island intensity. *Atmospheric Environment*, **63**, 261-275.
- Tiana-Alsina, J., Gutiérrez, M. A., Würth, I., Puigdefabregas, J., and Rocadenbosch, F., 2015 : Motion compensation study for a floating Doppler wind lidar. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 5379-5382.
- 八木綾子・稲垣厚至・神田学・藤原忠誠・藤吉康志, 2015 : ドップラーライダーを用いた筋状乱流構造の間隔に関する研究. 土木学会論文集 B1 (水工学), **71**, 415-420.
- 山口敦・石原孟, 2016 : 浮体式ドップラーライダーを用いた洋上風況観測手法の提案と検証. 風力エネルギー利用シンポジウム, **38**, 203-206.
- 若林蘭・川東龍則・山口敦・石原孟, 2014 : 6 自由度の動揺を考慮した浮体式ドップラーライダーの計測に関する研究. 風力エネルギー利用シンポジウム, **36**, 329-332.
- Wolken-Möhlmann, G., Lilov, H., and Lange, B., 2010 : Simulation of motion induced measurement errors for wind measurements using LIDAR on floating platforms. *Proceedings 15th International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing (ISARS)*, **15**, 28-30.

## Proposal and Verification of Inclinations Compensation Method for Scanning Doppler Lidar

NAKAMURA Yusuke\* , WATARAI Yasushi\*\* and NAKAGAWA Kiyotaka\*\*

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

\*\* Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

### Abstract:

Since the urban boundary layer greatly affects the weather forecast and the transport of pollutants, it is important to capture its developmental process. Moving observation by Doppler lidar is effective for research the structure of the urban boundary layer. However, in doing movement observation by Doppler lidar, it is necessary to compensation the inclinations. In this study, proposal and verification were carried out of inclinations compensation method for scanning Doppler lidar. As a result of comparing the fixed DL and the moving DL, It was shown that the difference between the two is reduced by applying the inclination compensation to the three dimensional wind calculated by the VAD method, and the value of the moving DL becomes close to the fixed DL. From this, the usefulness of the inclinations compensation method proposed in this study was verified. Furthermore, the value obtained by the inclination compensation was small compared with the observed value of the horizontal wind, but it occupied a maximum of 30% with respect to the observed value of the vertical wind.

**Key words:** Doppler lidar, Inclinations compensation method, Planetary boundary layer, Kumagaya city