

ドップラーライダー観測による都市域地表面の粗度長及びゼロ面変位高の推定 Estimation of roughness length and zero plane displacement height of the surfaces in urban area by doppler lidar observation

青柳暁典¹・大和佳裕²・坂本 修²・日谷道夫¹・栗田 進¹・高橋俊二¹
Toshinori Aoyagi¹, Yoshihiro Yamato², Osamu Sakamoto², Michio Hitani¹, Susumu Kurita¹, Shunji Takahashi¹

¹気象研究所、²英弘精機株式会社
¹ Meteorological Research Institute, ² EKO Instruments co., Ltd.

Abstract

Using a small doppler lidar system (Windcube, EKO Instruments co., Ltd. / Leosphere), we observed the vertical profiles of horizontal wind speed in urban area (@EKO Institute of technology, Shibuya, Tokyo), where is surrounded by many types and heights of buildings. We tried to estimate the roughness length and zero plane displacement height by least square fitting 10min. averaged observed profile to the theoretical log-law wind profile. About 900 profiles were obtained during 6 days observation period, and 132 profiles of them were adopted without divergence. As the results, the roughness length and the zero plane displacement height around the site was estimated to $0.60 \pm 0.88\text{m}$ and $14.8 \pm 8.8\text{m}$ (above the rooftop), respectively. The standard deviation of the roughness length was very large. We could, otherwise, obtain favorable information that the roughness length should be less than 2m from the fact that the 95% of the estimation of roughness length were less than 2m.

1.はじめに

気象モデルによる大気運動のシミュレーションでは、地表面の運動量粗度・熱粗度・熱容量・熱伝達率・土壌水分量・アルベドといったパラメータを下部境界条件として設定する。特に、運動量粗度は地表面摩擦の大きさを規定するパラメータで、地上風速の予測に大きく影響する。

地表面の粗度は粗度長 z_0 とゼロ面変位高 d で表現され、それらをもとにして接地層の運動量フラックスが計算される。これらのパラメータは、風速や気温の鉛直プロファイル観測によって概ねの値が決定されている。草原や田、砂礫地などでは、高さ数センチから数メートルの間隔で超音波風速温度計などを高々数メートルまで設置して、風速や気温の温度プロファイルを求められる。果樹園や森林など、粗度物体が大きい地表面では、高さ数 10 メートル～100 メートルに及ぶフラクスタワーを立てての風速・温度プロファイル観測がなされ、粗度の推定が行われている。しかしながら、東京など高度に発達した都市域では、タワーなどの観測設備の設置が容易ではなく、これまでそのような観測データセットはほとんど得られていないのが現状である。

このため、今回、小型のドップラーライダーシステムを用いて、都市域での風速鉛直プロファイル観測を行い、都市域地表面の運動量パラメータの推定を試みた。

2.測定システム

使用したシステムは、英弘精機株式会社の小型ドップラーライダーシステム Windcube (仏 Leosphere 社製) である。赤外域のアイセーフコヒーレントドップラーライダーシステムで、高度 40m から 200m まで、20m 刻みでの水平風観測が可能である。

Tab.1 にシステムの諸元を、Fig.1 にシステムの概観写真を示す。

Table 1. Specification of WINDCUBE

General	Range	40m - 200m	Laser	Wavelength	1540 nm
	Accumulation Time	0.5s		Pulse Energy	10 uJ
	Data Output	1Hz		Eye safety	IEC 60825-1
	Probed length	20m	Environ- ment	Temperature Range	-10 to +40 degC
	Scanning cone angle	~ 30 deg		Rainage protection	Wiper, raind detector
	Speed Accuracy	0.2m/s	Dimens- ions	W x D x H	900 x 550 x 550
	Speed range	Up to 60m/s		Weight	55kg
	Direction Accuracy	2 deg			
	Data Availability	Over 95% upto 150m			

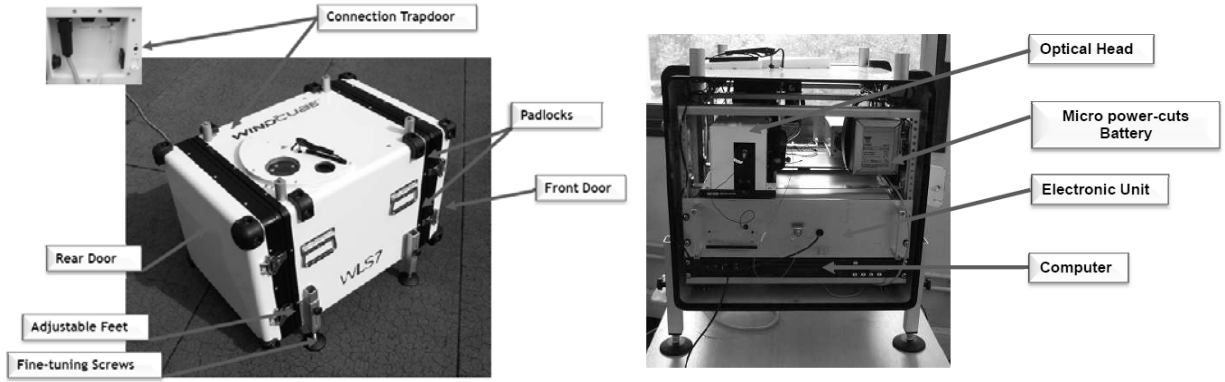


Figure 1. Overview of Windcube.

3.粗度長及びゼロ面変位高推定法

接地層では、大気安定度が中立であるという仮定をおくと、水平風速の鉛直分布は以下の式に従うことが知られている。

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad (1)$$

ここに、摩擦風速 u_* 、運動量粗度長 z_0 、ゼロ面変位高 d である。 u_* は上空の風の状態によって時々刻々変化するが、 z_0 と d は地表面状態のパラメータであるから観測ごとには変わらない。ドップラーライダーシステムで得られる10分平均風速の鉛直プロファイルを、この式に適合するように非線形最小二乗法でフィッティングすれば、その周辺の粗度長 z_0 とゼロ面変位高 d を推定することが可能となる。ただし、現実の大気では、周辺の粗度物体であるビル群の並びも一様ではなく、バラバラである。このため、水平風速を(1)式にフィッティングさせて得られた z_0 と d は、ある範囲で分布することが期待される。

未知数を u_* 、 z_0 、 d とする。1観測で例えば4つの高度で水平風速が得られるとし、それらのデータセットを (z_1, u_1) 、 (z_2, u_2) 、 (z_3, u_3) 、 (z_4, u_4) とする。これらが(1)式の形を取るとしたとき、残差平方和 e を以下の式で定義する。

$$e = \sum_i^4 f_i^2 \quad f_i \equiv u_i - \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z_i - d}{z_0}\right) \quad (2)$$

この残差平方和 e を最小とするような、未知数 u_* 、 z_0 、 d を決定する（最小二乗法）。残差平方和 e の極小点を求めるには、これを各未知数で偏微分し、それらが0となるような連立方程式を解けばよい。

$$\frac{\partial e}{\partial u_*} = 2 \sum_i^4 \frac{\partial f_i}{\partial u_*} f_i = 0, \quad \frac{\partial e}{\partial z_0} = 2 \sum_i^4 \frac{\partial f_i}{\partial z_0} f_i = 0, \quad \frac{\partial e}{\partial d} = 2 \sum_i^4 \frac{\partial f_i}{\partial d} f_i = 0 \quad (3)$$

ガウス・ニュートン法では、この残差 f_i を以下のように線形近似する。

$$f_i \approx f_{0,i} + \frac{\partial f_i}{\partial u_*} \Delta u_* + \frac{\partial f_i}{\partial z_0} \Delta z_0 + \frac{\partial f_i}{\partial d} \Delta d \quad (4)$$

これを(3)式に代入して、行列表記で整理すると以下のようなになる。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_*} & \frac{\partial f_2}{\partial u_*} & \frac{\partial f_3}{\partial u_*} & \frac{\partial f_4}{\partial u_*} \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_0} & \frac{\partial f_2}{\partial z_0} & \frac{\partial f_3}{\partial z_0} & \frac{\partial f_4}{\partial z_0} \\ \frac{\partial f_1}{\partial d} & \frac{\partial f_2}{\partial d} & \frac{\partial f_3}{\partial d} & \frac{\partial f_4}{\partial d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_*} & \frac{\partial f_1}{\partial z_0} & \frac{\partial f_1}{\partial d} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_*} & \frac{\partial f_2}{\partial z_0} & \frac{\partial f_2}{\partial d} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_*} & \frac{\partial f_3}{\partial z_0} & \frac{\partial f_3}{\partial d} \\ \frac{\partial f_4}{\partial u_*} & \frac{\partial f_4}{\partial z_0} & \frac{\partial f_4}{\partial d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_* \\ \Delta z_0 \\ \Delta d \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_*} & \frac{\partial f_2}{\partial u_*} & \frac{\partial f_3}{\partial u_*} & \frac{\partial f_4}{\partial u_*} \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_0} & \frac{\partial f_2}{\partial z_0} & \frac{\partial f_3}{\partial z_0} & \frac{\partial f_4}{\partial z_0} \\ \frac{\partial f_1}{\partial d} & \frac{\partial f_2}{\partial d} & \frac{\partial f_3}{\partial d} & \frac{\partial f_4}{\partial d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{0,1} \\ f_{0,2} \\ f_{0,3} \\ f_{0,4} \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \mathbf{J}^T \mathbf{J} \begin{pmatrix} \Delta u_* \\ \Delta z_0 \\ \Delta d \end{pmatrix} = -\mathbf{J}^T \begin{pmatrix} f_{0,1} \\ f_{0,2} \\ f_{0,3} \\ f_{0,4} \end{pmatrix} \quad (5)$$

左辺の2番目の行列はヤコビアン行列 (\mathbf{J} と表記) と呼ばれる。第1推定値を用いた評価関数 f_0 とヤコビアン行列 \mathbf{J} から、修正量 Δu_* , Δz_0 , Δd が求まる。この修正量を第1推定値に加えて次の推定値とする。この操作を繰り返すことで、 u_* , z_0 , d がある値に収束する。

今回は、このガウス・ニュートン法を改良したマルカート法を用いてフィッティングを行った。マルカート法では、下式のようにマルカート数と呼ばれるパラメータ λ を導入し、非線形性が強い場合にも発散しにくくなるよう修正量を調整する。

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) \begin{pmatrix} \Delta u_* \\ \Delta z_0 \\ \Delta d \end{pmatrix} = -\mathbf{J}^T \begin{pmatrix} f_{0,1} \\ f_{0,2} \\ f_{0,3} \\ f_{0,4} \end{pmatrix} \quad (6)$$

4.観測結果

都心での観測は、東京都渋谷区にある英弘精機株式会社の技術研究所の屋上で実施した。観測点の高さは地上約15m。観測地点から周辺を望む写真を Fig.2 に示す。周辺には、様々な高さのビル群が林立している様子が見える。



Figure 2. The views of surroundings at the observation site. West(left), north-west(center), north(right) views are shown.

観測期間は2009年5月18日夜～25日朝までである。観測場所に一番近いアメダスから、期間を通して降水イベントがなかったことがわかっている。Fig.3に観測期間の各観測高度(40m, 60m, 80m, 100m)における水平風速データの時系列を示す。

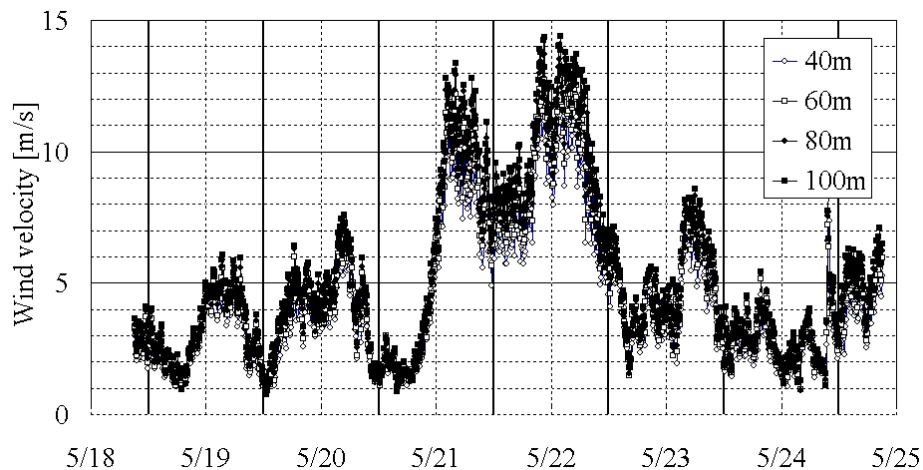


Figure 3. The time series of the horizontal wind velocities at 4 altitude.

全観測データは 937 プロファイルで、それらを(1)式にフィッティングし、 z_0, d を各観測データについて求めた。最小二乗法による解が発散せず求めることができたのは、そのうち 132 個のデータであった。得られた z_0 と d のヒストグラムをFig.4 に示す。これらのデータセットから、観測地点である渋谷区幡ヶ谷の周辺の粗度長は $0.60 \pm 0.88\text{m}$ 、ゼロ面変位高は $14.8 \pm 8.8\text{m}$ (屋上面からの高さ)と推定された。いずれも推定値のばらつきが大きい、粗度長の推定では約 95%が 2m以下の区分に入っていること、ゼロ面変位高の推定では全て 35m以下であったことは重要な情報である。

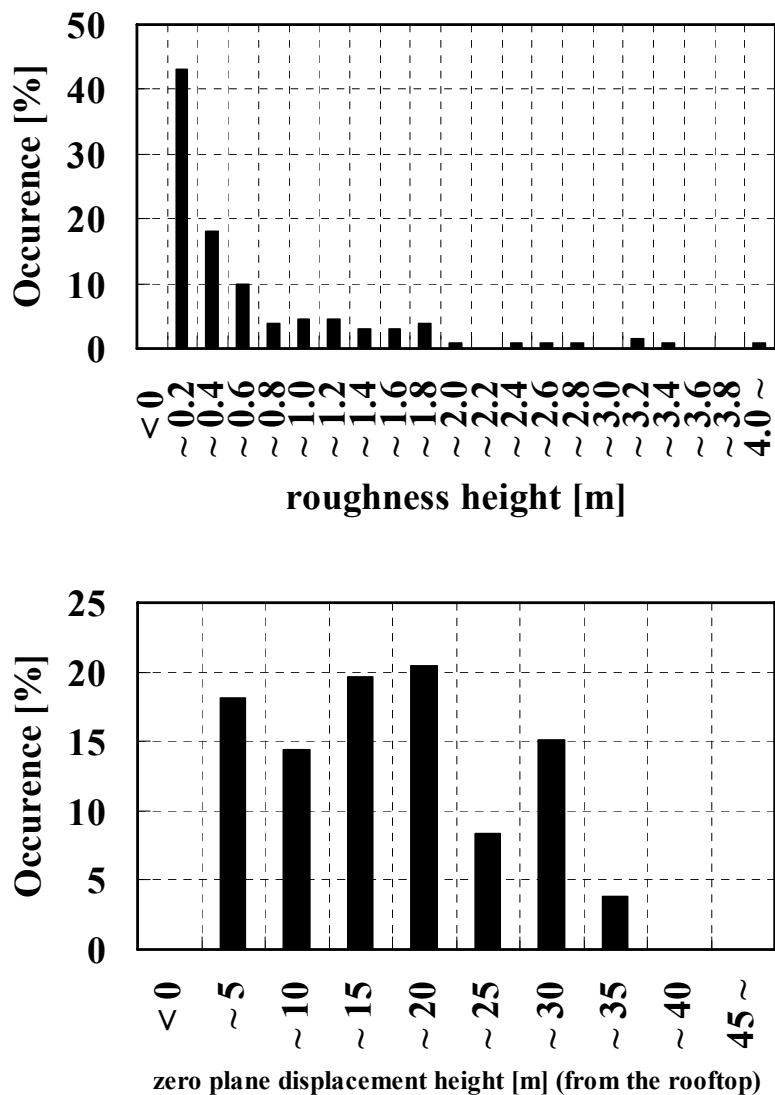


Figure 4. The histograms of calculated roughness length and zero plane displacement height.

5. 今後の課題

今回試行した推定結果では、粗度長及びゼロ面変位高に大きなバラツキが見られた。この一因として、周辺ビル群の高さの不均一性が考えられる。高さ H の大気は、概ね風上方向 $10H$ の範囲にある地表面の影響を持つといわれており、仮に $H=100\text{m}$ とすれば観測地点周辺 1km の影響を考える必要がある。この影響を考慮するには、風向別の統計を取ればよいのであるが、残念ながら現状のデータセットでは不十分である。今後、このような小型リモートセンシング機器を用いた都心での長期にわたる大気鉛直分布観測が望まれる。

また今回の推定では、大気安定度が中立であるという大きな仮定を置いている。現実の大気は、日中は不安定で夜間は安定な成層状態となる。そのため、今回用いた小型のドップラーライダーシステム等による風の観測と同時に、気温またはそれに準ずる気象要素の鉛直プロファイル観測も可能となれば、安定度に依存した風速プロファイルも考慮した式をもとにフィッティングを行うことで、より精度の良い地表面粗度の推定が期待できる。