

# 空気力学的粗度とゼロ面変位高度の推定値を用いた館野の風況調査

甲斐 智博\*

## Investigation of a wind state using estimate of roughness and zero plane displacement height at Tateno

Tomohiro KAI

### 要旨

高層気象台では、気球による高層気象観測として、定常的に実施している GPS ゾンデによる高層気象観測、オゾンゾンデ観測に加え、GPS ゾンデの相互比較観測など種々の調査を目的とした高層気象観測を実施している。これらの観測のより安全で効率的な実施のために、数値予報の資料に加えて、付近の地物の細かな構造などを考慮した放球地点(館野)の風況を把握しておくことが重要である。

本稿では館野の風況調査として、高層気象台で定常的に観測が実施されている測風ライダーと、JMA-10型地上気象観測装置の風向風速計の観測データを利用し、風向を4方向にわけそれぞれの方向の空気力学的粗度 $z_0$ とゼロ面変位高度 $d$ を求めた。更にこの結果を利用して境界層理論から推定される突風率を調査した。この結果、おおむね北側で突風率が大きく南側で小さい傾向があった。

### 1. はじめに

館野にある高層気象台では、気球による高層気象観測として、1日2回のGPSゾンデによる高層気象観測、週1回のオゾンゾンデによる大気オゾンプロファイル観測を実施している。また、これらの定常的な観測のほかに、機器変更に伴うGPSゾンデの相互比較観測など試験的な観測も実施している。これらの実施計画にあたり、オゾンゾンデや試験観測については、気球に吊り下げる観測機器のサイズが大きいことなどから、観測当日の風況、観測終了後の落下位置などを基に総合的に実施可否を判断している。この時風況を把握するため用いる資料は、現状ではGSMなどの数値予報資料や、JMA-10型地上気象観測装置の風向風速計(以下風向風速計と記述する)の実況値である。これらの資料からおおよその風況は把握できるが、突風など細かな風況については、付近の地物の影響もありこれらの資料だけでは把握が困難な部分もある。したがって、付近の地物の影響などもふまえ、館野に特化した風況に関する資料があれば、高層気象観測のより効率的で安全な実施に寄与できると考えられる。

本稿では突風率に着目し、館野の風況調査を実施した。突風率は用途によって種々の定義がされる場合があるが、

一般に風工学の分野では、10分間平均風速とその10分内の最大瞬間風速の比で定義される。本稿でもこの定義にしたがい調査を進めることとする。

突風率は地物の構造と密接なかわりがあり、これらの影響を考慮した風況を理解するうえで重要な要素である。過去にも突風率に着目した研究がなされており、たとえば、桑形(1993)や萩野谷(2015)は長期的な突風率の状況から、観測環境の変化について議論した。本稿では、測風ライダーで観測された館野の風速の鉛直分布から、空気力学的粗度など地表面に関する構造を決定し風況を議論する。

### 2. 突風率推定式の概要

突風率の理論的な関係式は、中立な接地境界層を仮定すれば、以下のように導かれる(桑形・近藤：1992)。

中立な接地境界層内では、次式で示される風速の対数分布が成り立つ。

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

ここで $u(z)$ は地上高度 $z$ における平均風速、 $u_*$ は摩擦速度、 $k(=0.4)$ はカルマン定数、 $d$ はゼロ面変位高度、 $z_0$ は空気力学的粗度である。一方、最大瞬間風速 $u_{max}$ と平均風速の関係は、主風向方向の風速の乱れの標準偏差 $\sigma_u$ を用いて、

$$u_{max} = u + \gamma \sigma_u \quad (2)$$

\*高層気象台 観測第一課 (現 大阪管区気象台 予報課)

とあらわされる。ここで $\gamma$ は風速計の追従性などに依存する定数で、平均的には $\gamma=3$ となるが、おおむね2から4の値をとる。また、風の攪乱効果に関する大気安定度の関数 $f$ (中立では2.5から3)は、

$$f = \frac{\sigma_u}{u_*} \quad (3)$$

とあらわされる。(1)から(3)式より $u_*$ と $\sigma_u$ を消去すると、

$$\frac{u_{max}}{u} = 1 + \frac{kfy}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)} \quad (4)$$

となり、これらの条件のもとで $kfy$ のとりうる値の範囲はおおよそ $kfy \cong 2\sim 5$ である。仮に(4)式右辺が既知であれば突風率を求めることができる。

### 3. $z_0$ , $d$ , 及び $u_*$ の推定

#### 3.1 概要

青柳ほか(2014)は、測風ライダー観測で得られた10分間平均風速の鉛直分布を、ガウス・ニュートン法を改良したマルカート法を用いて、(1)式に適合するように非線形最小二乗フィッティングさせ、 $z_0$ ,  $d$ , 及び $u_*$ の地表面パラメータの値を求めた。本稿でもこの手法を参考にこれらの値を求める。

高層気象台では、2009年12月に測風ライダーが整備された。性能として、高度分解能は、30m, 75m, 及び150mの3モードあり、最大観測高度は150mモードのおおよそ上空3000mまでである。これまで、データの品質管理手法の開発(岩渕: 2012), VAD(Velocity Azimuth Display)法による風ベクトルの算出(星野・岩渕: 2013), また各モードの精度評価(星野: 2015)がなされており、調査研究や現業での利用を目的とした検証が進められている。

本稿では、主に30mモードで観測された、2014年の10分間平均風速の第0層から3層(40m, 70m, 100m, 130m)の4高度のデータを利用する。またこれらに加え、同時刻の風向風速計(地上高度20.4m)の10分平均風速のデータ、以上5点の風速の鉛直分布データを用いて(1)式にフィッティングさせた。

#### 3.2 データの選択

マルカート法を用いたとき、明らかに(1)式から外れるような鉛直分布の場合、数値計算は正常に収束しないため、このようなデータについては除外する。また、正常に収束したものの中から、以下に述べる条件を満たすものを選択する。

##### (a) 各パラメータのとりうる範囲

$u_*$ は風の状況によって変化するが、 $z_0$ と $d$ は地表面構造

のパラメータであるため、短期間で変わることはない。ただし、周辺の地物の配置や高さは一様ではなく、風向によって風が地物から受ける影響が異なるため、 $z_0$ と $d$ はある程度範囲を持って分布することが予想される。星野(2015)は、測風ライダーと風向風速計の比較のため、測風ライダーの風速の鉛直分布データから最小二乗法を用いて、 $z_0$ と $d$ を求めた。この際 $z_0$ の妥当な範囲の閾値の設定について、国土数値情報の「都市地域土地利用細分メッシュ」のメッシュデータから推定した高層気象台の半径2km内の値を基に設定し、 $d$ については風向風速計の設置高度以下とし次のように設定した。

$$\begin{aligned} 0 \leq d \leq 15, \\ 0 \leq z_0 \leq 2.2 \end{aligned} \quad (5)$$

本稿でもこれと同様の範囲に設定し、かつ $u_* \geq 0$ という条件をくわえ、これらの条件をこえる範囲で収束したデータについては、現実的ではないとして除外した。

##### (b) 風向風速計のデータ

地上気象観測指針によると、真の風速と風向風速計で観測された風速の比である風速係数について、値が1になるように補正しているが、風が弱い(特に2m/s以下)の時、1になるように補正することが困難な場合がある。このように、風が弱いとデータの信頼度が低い可能性があるため、ある程度の精度があると考えられる、平均風速が3m/s以上のデータを採用する。

##### (c) 風向風速計の追従性・大気の安定度

(4)式右辺第2項 $kfy$ のとりうる値は、中立な接地境界層という条件下ではおおよそ2から5となる。したがって、この範囲に入らないような場合は、中立な接地境界層という条件から大きく外れる可能性がある。(a)と(b)の条件で求めた $z_0$ と $d$ , 同時刻の風向風速計の10分間平均風速 $u_{10mean}$ と10分内の最大瞬間風速 $u_{max}$ から計算した突風率

$$a_{10aero} \equiv \frac{u_{max}}{u_{10mean}} \quad (6)$$

を用いて、(4)式の関係より $kfy$ を計算し、2から5に入らないものは除外した。例として、(a)と(b)の条件を課し残ったデータの突風率と、(4)式の右辺第2項分母の関係について、1月のデータを図1に示す。

### 3.3 各パラメータの決定

3.1項と3.2項で述べた方法で、10分間平均風速の鉛直分布より得られる10分ごとの各地表面パラメータのデータを風向ごとに分類する。この時、風向の分類については、簡単のため風向風速計のデータを用いて、16方位で1, 2, 15, 及び16を北, 3から6を東, 7から10を南,

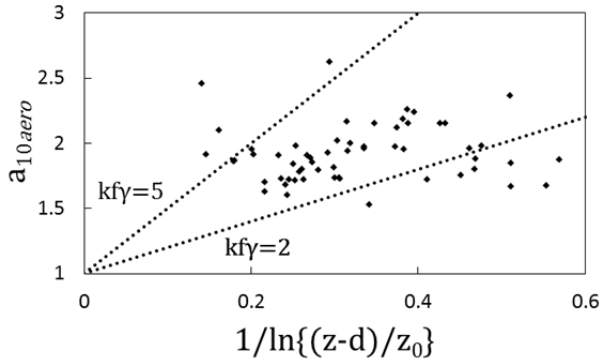


図 1 突風率と地表面パラメータの関係。

破線はkfyが2から5における、(4)式から求めた突風率の理論値のとりうる範囲である。このように理論値の範囲外のデータについては除外した。

11から14を西とした。これらを基に、各風向における地表面パラメータの対数平均値 $\bar{z}_0$ と $\bar{d}$ 、及び各データの対数値のばらつきから推定される $z_0$ と $d$ のとりうる範囲について次式を用いて見積もる。

$$\begin{aligned}
 \bar{x} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log(z_{0i}), \\
 \bar{z}_0 &= \exp\{\bar{x}\}, \\
 \bar{y} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log(z - d_i), \\
 \bar{d} &= z - \exp\{\bar{y}\}, \\
 \sigma_x &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log(z_{0i}) - \log(\bar{z}_0))^2}, \\
 \sigma_y &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log(z - d_i) - \log(z - \bar{d}))^2}, \\
 \exp(\bar{x} - \sigma_x) &\leq z_0 \leq \exp(\bar{x} + \sigma_x), \\
 z - \exp(\bar{y} + \sigma_y) &\leq d \leq z - \exp(\bar{y} - \sigma_y).
 \end{aligned} \tag{7}$$

ここで、 $z_{0i}$ と $d_i$ は各データの値、 $N$ は事例数をあらわす。また $z$ は風向風速計の設置地上高度として20.4mを採用した。

表1に結果を示す。なお事例数は、欠側がなく正常に鉛直分布を観測できたデータ(5944個)のうち、3.2の方法で取り除かれ、平均に採用できた数である。データ取得率は、同様な研究、青柳ほか(2014)、星野(2015)と比較して高い。これについては、マルカート法の収束判定、設定の違いのほか、測風ライダーより低高度にある風向風速計のデータを採用したことも一因であると考えられる。

この結果について、星野(2015)が求めた国土数値情報の「都市地域土地利用細分メッシュ」のメッシュデータか

表 1 各パラメータの値

	N	$u_*$ [m/s]	$z_{0min} \leq \bar{z}_0 \leq z_{0max}$ [m]	$d_{min} \leq \bar{d} \leq d_{max}$ [m]
北	62	0.57	$0.22 \leq 0.51 \leq 1.21$	$6.71 \leq 11.03 \leq 13.99$
東	291	0.46	$0.09 \leq 0.24 \leq 0.63$	$7.84 \leq 11.50 \leq 14.09$
南	667	0.56	$0.10 \leq 0.25 \leq 0.66$	$5.09 \leq 9.81 \leq 13.08$
西	75	0.74	$0.14 \leq 0.38 \leq 1.02$	$6.71 \leq 10.68 \leq 13.50$

表 2 星野(2015)による各方向の $z_0$

北	東	南	西
0.73	0.72	0.47	0.48

ら推定した高層気象台近傍の $z_0$ (表2)と比較する。

表1と表2により、本稿で求めた $z_0$ の平均値は、いずれの方角においても星野(2015)のものと比較して値が小さい。星野(2015)の値がより真値に近いと仮定すると、本稿で求めた結果との差の原因について次のような可能性があると考えられる。

高層気象台における測風ライダーの運用は、観測時間はおおよそ8時30分から21時00分で、降水やその他のシビア現象がない条件で観測している。このため観測データとしては、天気と比較的良好の日中、すなわち熱的に不安定な状況のデータが割合として多いと考えられる。実際の気象では、完全に中立ということはほとんどなく、多少なりとも安定か不安定になっていることが大半である。本稿では、3.2で説明したデータの選択方法により、中立に近いデータを採用しているはずであるが、先に述べたデータの偏りにより、やや不安定な気象におけるデータを多く採用している可能性がある。気象安定度が中立ではない場合、(1)式に補正項がつき、風速の鉛直分布は次のようにあらわされる(Garrat:1992)。

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) - \Psi\left(\frac{z}{L}\right). \tag{8}$$

ここで、 $L$ はモニン・オブコフ長で安定度のスケールをあらわす。補正項 $\Psi$ は高度の関数で、高度が高くなるほど補正が大きくなり、安定で負、不安定で正の値となることが知られている。日中など熱的に不安定な状況では大気の混合が進み、地表面付近の風速と上空の風速の差が中立時に比べて小さくなるが、(8)式の補正項はこのような影響を補正するためのものである。このように、大気の安定度により風速の鉛直プロファイルも定性的に変化するため、フィッティングの際系統的な誤差を生む原因となると考えられる。本稿の結果も、風向にかかわらずこのような系統的な誤差が含まれている可能性があり、より精度良い解析を行うには補正項も考慮したフィッティングを行う必要がある。

表 3 各方向の突風率

北	東	南	西
2.20	1.97	1.93	2.08

表 4 風向風速計から求めた 2014 年の平均突風率

北	東	南	西
2.00±0.23	1.95±0.22	1.80±0.18	1.95±0.21

表 5 風向風速計から求めた 2015 年の平均突風率

北	東	南	西
1.99±0.22	1.97±0.21	1.81±0.18	1.97±0.20

#### 4. 風向風速計から推定した突風率との比較

表1の結果と(4)式から、各風向の突風率を計算した結果を表3に示す。この時、 $kfy$ は中間値の3.5、高度 $z$ は比較のため風向風速計の設置高度の20.4mと設定した。

一方、2014年の1年分の風向風速計の観測データのうち、10分間平均風速が3m/s以上のデータから10分ごとに $a_{10aero}$ を計算し、3.3項で述べたのと同様に風向を分類し、風向ごとの相加平均、標準偏差を計算した結果を表4に示す。

表3と表4を比較すると、いずれも突風率は北側で値が大きく南側で小さい傾向にある。一般に(4)式より、 $z_0$ と $d$ の値が大きいと突風率が大きいが、表1、表2いずれも $z_0$ の値は北側が南側より大きく対応が良い。したがって、これについては北側、南側の地物の特徴が対応良く反映された結果であると考えられる。また、表4と同様の解析を2015年の風向風速計の観測データに適用した結果を表5に示す。

2014年と2015年では平均突風率に大きな差はなく、同様に北側で値が大きく南側で値が小さいため、この傾向は気候的な影響ではなく、やはり高層気象台近傍の地物の特徴が反映されていると考えられる。

このように、本稿で示したいずれの結果も、北側が南側より空気力学的粗度が大きく、これに対応して突風率が大ききことを支持しており、館野の風況の特徴の一つとして結論付けできる可能性が高い。

#### 5. まとめと課題

本稿では、高層気象台で実施されている気球を用いた高層気象観測の安全な飛揚に寄与するため、高層気象台で定常的に観測されている2014年の測風ライダーなどの観測データを用い、館野の風況についておおまかに4方向にわけて調査した。

館野の風況について、一般に地表面パラメータ $z_0$ と $d$ が

大きいほど突風率は大きい、本稿で風速の鉛直分布から求めた館野の地表面パラメータは、おおむね北側で値が大きく南側で小さい傾向であった。一方、風向風速計から求めた突風率でも、2014年、2015年ともに北側で値が大きく南側で小さいため、両者の傾向はあっている。以上より、館野の風況に関する一つの知見として、同等の平均風速の場合では、おおよそ北向きの風は地物の影響を受け最大瞬間風速の値は大きくなりやすく、南側の風は相対的に最大瞬間風速の値は小さいと考えられる。本稿では、おおむね4方向にわけて調査したが、さらに細かく方向をわけて調査すれば、より詳細な傾向を得られると考えられる。

一方、本稿で示した測風ライダーから求めた $z_0$ と $d$ について、利用した風速の鉛直プロファイルの観測データは、測風ライダーの観測が日中中心に実施されていることと、本稿での考察から、大気の状態が中立に近いがやや不安定側に傾いたデータを多く採用していた可能性が高く、この点は留意する必要がある。

仮に $z_0$ と $d$ の値が既知であれば、(4)式より平均風速から最大瞬間風速の値を推定することができ(小寺ほか:2009)、量的なプロダクトの提供が期待される。今後このようなことを検討する場合は、より正確に $z_0$ と $d$ を求めることが必要で、例えば大気の安定度も考慮したフィッティングや、観測時刻に偏りのないデータセットの解析を行うことなどで改善できる可能性がある。また、基礎となる観測データが持つ誤差による推定値の広がりや、適切な $kfy$ の設定を考慮する必要がある。

#### 謝 辞

本稿を草するに際し、高層気象台観測第一課阿保敏広課長、観測第二課星野俊介測器技術係長に助言を頂きました。また、高層気象台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。ここに感謝の意を表します。

#### 引用文献

- 青柳暁典・泉敏治・酒井哲・永井智広(2014): ドップラーライダーDBS計測による都市域の粗度長とゼロ面変位高の推定. 風向学シンポジウム, **23**, 10.
- Garrat J.R. (1992): The atmospheric boundary layer. Cambridge University Press, 53pp.
- 萩野谷成徳(2015): 突風率から推定した地表面粗度の長期変化. 天気, **62**, 17 - 24.
- 星野俊介・岩淵真海(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.

- 星野俊介(2015): 測風ライダーの観測モード別精度評価.  
高層気象台彙報, **73**, 1 - 10.
- 岩淵真海(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.
- 小寺裕之・佐藤悦信・金森祥一(2009): 地表面粗度を用いた  
瞬間風速に関する量的予報プロダクトの開発. 気象  
庁研究時報, **61**, 21 - 31.
- 桑形恒男・近藤純正(1990): 東北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.
- 桑形恒男・近藤純正(1992): 風速計高度や粗度の違いを考  
慮した1991年台風19号の強風解析. 自然災害科学, **11**, 2,  
2, 87 - 96.
- 桑形恒男(1993): 大型台風にともなった気象官署の突風率  
の長期変化. 天気, **40**, 91 - 97.

