

筑波山における風の観測法について

Observational Method of Wind over the Top of Mt. Tsukuba

依田 知浩*・花房 龍男**・林 陽生*・大和 佳祐**

Tomohiro YODA*, Tatsuo HANAFUSA**, Yousay HAYASHI* and Yoshihiro YAMATO**

I はじめに

大気境界層上部の風向風速を観測するためには観測塔などを建てて計測する方法があるが、十分な高度をとるには多くの経費が必要となる。そこで、山岳に観測地点を設け、上空の風の様子を測定することが一般に行われるが、山体の影響を受けた風向風速の値を観測することになる場合が往々にしてある。特に、プロベラ型風向風速計のように風向と風速の感部が一体の測器で測定する場合には、風の乱れが強くなると風向変動が大きくなるため風速を過小評価することが示唆されている(光田, 1970)。

超音波風向風速温度計は、こうした問題点を解明するために有効である。実用的な超音波風向風速温度計は1960年代に開発された(Businger *et al.*, 1969)。その後光田(1970)は、超音波風向風速温度計を基準として種々の風速計を比較し、弱風時や風の鉛直成分が大きな場合には一般の風速計では誤差が生じることを示した。一方、上空の風の様子を観測する際にはドップラーソーダーが有効であり、花房ほか(1994)やHanafusa *et al.* (1995)が複雑な地形上での測定を行っている。その他のリモートセンシングによる風観測の有効性については花房(2003)がまとめている。

本研究では、筑波山の男体山(標高871 m)の山頂に設置したプロベラ型風向風速計の観測値が山体の影響をどの程度受け、誤差を含んでいるかについて、超音波風向風速温度計、ドップラーソーダーの観測値を用いて解析したので報告する。

II 観測方法および観測機器

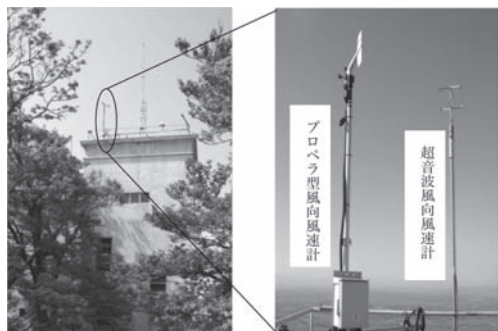
2006年1月より筑波山の男体山山頂で、筑波大学がアメダスを継承して気象観測を開始した(Hayashi *et al.*, 2006)。観測項目には風向風速が含まれており、プロベラ型風向風速計(YOUNG MODEL 05103-47)を旧アメダスと同様に気象観測所の屋上に設置して風向と風速を観測している。プロベラ型風向風速計から約1.5 m離れた位置に、3次元超音波風向風速計(USA-1(英弘精機, 2007))を設置した(第1図)。さらに、山頂より標高の低い地点(ケーブルカー山頂駅付近)にフラット・アレイ型ドップラーソーダー(SFAS64)を設置した。第2図aに筑波山の地形図を示す。第2図bは第2図a上の線A-Bに沿った地形断面図に測器の設置概要を示した。プロベラ型風向風速計、超音波風向風速温度計、ドップラーソーダーの測器の仕様を第1表、第2表、第

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

** 英弘精機株式会社

3表にそれぞれ示す。

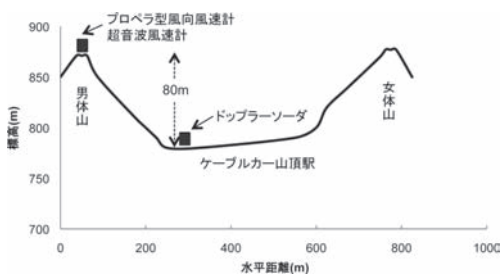
超音波風向風速温度計については2007年11月から2008年3月に観測を行い10分間平均値を求めた。ドップラーソーダは2007年7月から10月に観測を行い30分平均値を求め解析に用いた。超音波風向風速温度計とドップラーソーダは同



第1図 プロペラ型風向風速計と超音波風向風速計の設置状況



第2図 a 観測地域の概要



第2図 b 測器の設置地点と地形の関係

時期に設置することが望ましかったが、今回は測器の設置の都合上、異なる時期での観測となった。しかし、本研究の目的は、筑波山山頂における風系調査ではなく、現在観測を実施している手法による値の差異を明らかにすることであるため本質的な影響はないと判断した。

超音波風向風速温度計は、送受信機の中の音の伝播速度から風向風速を測定するもので、感部自体に可動部分がないため風の乱れにより測定値が左右されない利点がある (Hanafusa *et al.*, 1995)。また、ドップラーソーダは上空に発射した音波のドップラーシフトから上空の風向風速を測定するもので、塔などの設置が不要で上空まで観測ができ、原理的に検定が不必要な機器である (花房ほか, 2007)。

第1表 プロペラ型風向風速計 (YOUNG MODEL 05103-47) の仕様

項目	
起動風速	風速: 1.0 m/s (測定範囲 0~60 m/s) 風向: 1.1 m/s (10°)
距離常数*	風速: 2.7 m/s (63%)

* 風速を急に变化させた時に、風速計がその変化に63% 追従する間に気塊が風速計を通過する距離

第2表 3次元超音波風向風速計 (USA-1) の仕様

項目	
測定範囲/分解能	風速: 0 ~ 45 m/s ± 0.01 m/s
	X, Y, Z 風速: - 45 ~ + 45 m/s ± 0.01 m/s
	風向: 0 ~ 359° ± 1°
	温度: - 30 ~ + 50° ± 0.01 K
サンプリングレート	0.1 ~ 25 Hz
アナログ出力4成分	0 ~ 10 VDC
シリアルポート出力	RS422
超音波バス長	180 mm
動作温度	- 30 ~ + 50°
電源	24 VDC 2.5 W
重量	3 Kg

第3表 フラット・アレイ型ドップラーソナー(SFAS64)の仕様

項目	SFAS64の仕様	備考
エレメント数	64	ピエゾ粒子
周波数	2850～4750 Hz	設定可
出力	2.5 W	設定可
使用周波数	80 波長から最大 10 波長選択	設定可
送受信アングル	0° , ± 22° , ± 26°	9 ビーム設定可
垂直測定層	最大 100	設定可
垂直測定厚み	5～100 m	設定可
最低測定設定高度	10 m	最低層高度
最大測定設定高度	200～500 m	マルチ周波数モード時
平均時間設定	1分～60分	パラメータ設定による
水平風速精度	0.1～0.3 m/s	マルチ周波数モードにおいて
垂直風速精度	0.3～0.1 m/s	マルチ周波数モードにおいて
風向精度	2～3°	風速 2 m/s 以上
水平測定範囲	- 50～+50 m 最大	
垂直測定範囲	- 10～+10 m 最大	
動作温度範囲	- 35～+50℃	アンテナ、プロセッシングユニット
電力	± 18 VDC 100 W ピーク 平均 30～50 W	
サイズ	0.44 × 0.46 × 0.13 m	音響エンクロージャ無
重量	11.5 Kg	

III 観測結果

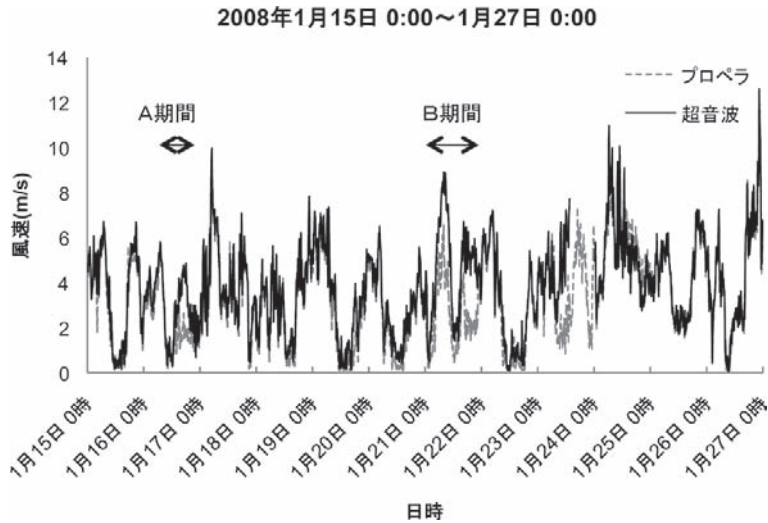
1. プロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計の比較

第3図に2008年1月15日0時から1月27日0時におけるプロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計の風速の10分間平均値の時間変化を示す。この図によると、図中に示したA期間(1月16日12時頃～16日22時頃)、B期間(1月21日2時頃～21日22時頃)において、プロペラ型風向風速計の観測値が超音波風向風速温度計に比べ小さくなっていることが認められた。また、第4図にプロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計による風速の比較を示す。値はほぼ1:1の直線上に並んでいるが、一部分においてプロペラ型風向風速計の値が小さくなっていることが確認できた。第3図、第4図から、ある固有の条件においてプロペラ型風向風速温度計の観測値が過小評価されるのではないかと推測される。

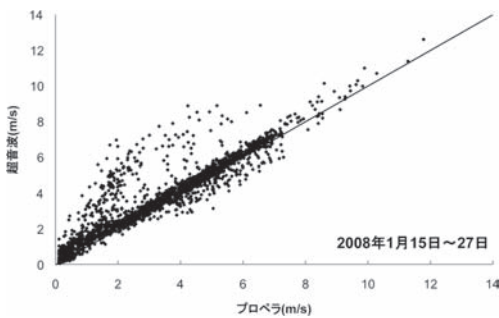
そこで、超音波風向風速温度計で観測された平

均風速が3 m/s 以上の場合について、全ての期間にわたって風向別にプロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計の風速比を第5図に示す。風速比はプロペラ型風向風速計の観測値を超音波風向風速温度計の観測値で除した値である。この図から明らかなように、プロペラ型風向風速計の観測値は超音波風向風速温度計の観測値に比べ風速を弱く示したことが分かった。さらに、超音波風向風速温度計の風向が50度付近になる場合に限って風速比が小さくなる、つまり、プロペラ型風向風速計による観測値が過小評価されていることが示唆された。この値は第3図や第4図においてプロペラ型風向風速計の観測値が小さく表れている場合と対応していた。一方、90度付近と270度付近は風速比が大きくなっており、プロペラ型風向風速計の過大評価が考えられる。

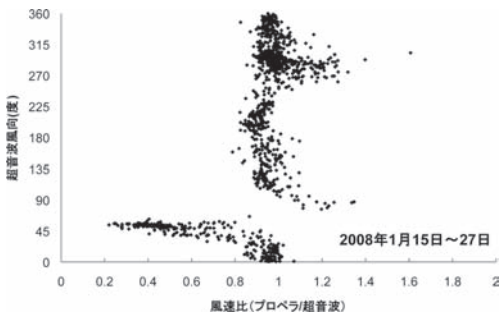
また、第6図にプロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計による風向の比較を示す。この図から、超音波風向風速温度計の風向が50度近傍を示す場合に、プロペラ型風向風速計の観測値と



第3図 風速の時間変化の比較 (2008年1月15日0:00～27日0:00)



第4図 風速の比較 (プロペラ/超音波)



第5図 風向別風速比 (プロペラ/超音波)

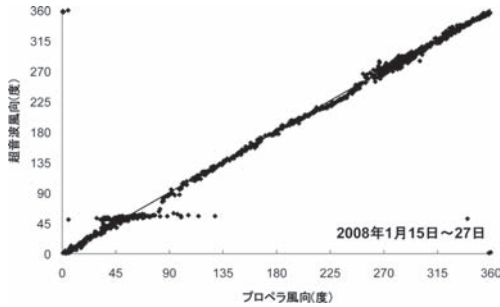
が約 50 度を示した場合に、プロペラ型風向風速計の観測値は正確な値となっていない可能性があることが示唆された。この要因については2節に述べる。

2. 風速の観測値が異なる要因

第7図 a に気象観測所の屋上の概要図を示す。プロペラ型風向風速計は気象観測所の屋上の南西側の角に設置しており、超音波風向風速温度計はプロペラ型風向風速計の西側に約 1.5 m 離して設置した。その他に、屋上の中央には第7図 b に示したような避雷針が存在しており、プロペラ型風向風速計の北東側、超音波風向風速温度計の東北東側に位置している。そのため、超音波風速温度計では、70 度方向からの風は避雷針が障害となるため正確な観測ができないと考えられる。また、東北東の風が避雷針を周り込む際に、東側を通過した気流はプロペラ型風向風速計では正確に観測できるが、超音波風向風速温度計ではその影響が出ているものと考えられる。反対に、避雷針の北側を通過する気流は超音波風向風速温度計では正確に観測できるが、プロペラ型風向風速計では影響が出ていると考えられる。さらに、避雷針

一致していないことが分かった。

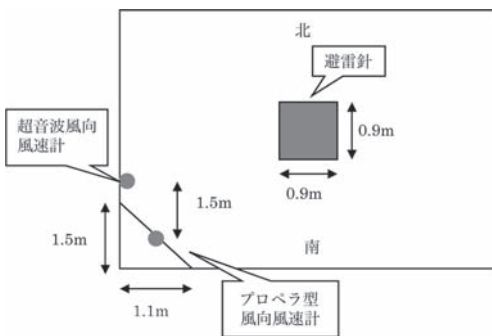
以上の結果から、超音波風向風速温度計の風向



第 6 図 風向の比較（プロペラ／超音波）



第 7 図 b 避雷針の様子



第 7 図 a 気象観測所屋上の概要図

の影響で気流に乱れが生じると、光田（1970）が指摘しているようにプロペラ型風向風速計では風速を過小評価していると思われる。そのため、第 5 図の風向別風速比では、50 度付近で風速比の低下、70 度付近の観測値がごく僅かであるが風速比が小さく、90 度付近で風速比が大きくなっていると考えられる。

また、第 5 図では 270 度付近においても風速比の増大が見られた。この要因として、プロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計は屋上の西側に面しているため、約 270 度からの風は、建物からの吹き上げが影響していると考えられる。厳密には、プロペラ型風向風速計は屋上の南西側の角に設置されているので、屋上の西端からは若干距離があるため吹き上げてきた強風の気流を測定しやすいが、超音波風向風速温度計は屋上の西端のすぐ上に設置したので、建物の影響で弱風域の風

を測定しているためと思われる。すなわちプロペラ型風向風速計では強めに、超音波風向風速温度計では弱めに観測され、結果として風速比が大きくなったものと考えられるが、これについては今後の課題として実験的に調べる必要性がある。

3. プロペラ型風向風速計とドップラーソーダーの比較

プロペラ型風向風速計の観測値には 2 節で言及した建物の影響のほかに地形の影響を含んでいることが考えられる。そこで、ケーブルカーの山頂駅付近に設置したドップラーソーダーの観測値との比較を行った。但し、第 2 図 b から分かるように、ドップラーソーダーの東西にはそれぞれ女体山と男体山が位置するため、ドップラーソーダーの観測値に地形の影響を含んでしまう可能性がある。そこで、ドップラーソーダーの設置箇所から高さ 180 m の観測値を基準に強風時（3 m/s 以上）で比較的地形の影響が少ないと思われる南北の風の場合を比較対象とした。

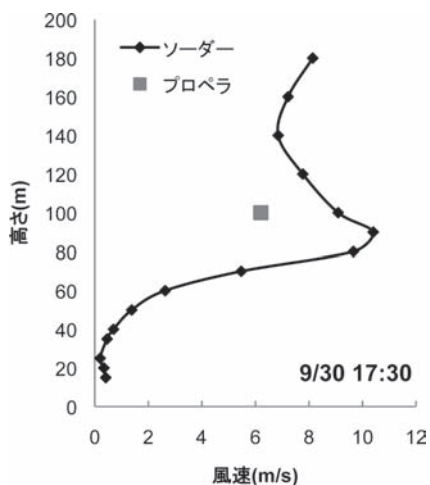
第 8 図 a・b、第 9 図 a・b は、北風の場合（9 月 30 日 17 時 30 分）と南風の場合（9 月 9 日 21 時 30 分）について、それぞれドップラーソーダーで観測した風向風速の鉛直プロファイルとその時のプロペラ型風向風速計の観測値を示した。特に

北風の場合に、ドップラーソーダーの観測値に比べてプロペラ型風向風速計の観測値が小さいことが分かった。第8図a, 第9図aのドップラーソーダーで測定した風の鉛直プロファイルを見ると、高さ100 m付近で風速の極大を迎えており、この高さはプロペラ型風向風速計を設置している高さに相当する。つまり、プロペラ型風向風速計が設置してある高さでは山体の影響で風速が強く、

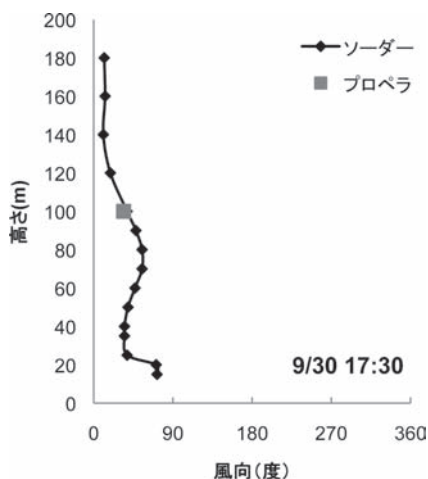
乱れの強い気流が生じていることが推測される。そのため、風向と風速の感部が一体であるプロペラ型風向風速計では風向変動が大きくなるため、風速が過小評価されることが考えられた。

IV まとめ

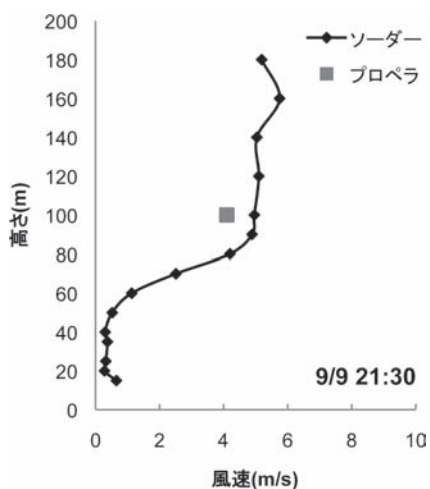
山頂に設置したプロペラ型風向風速計の観測値



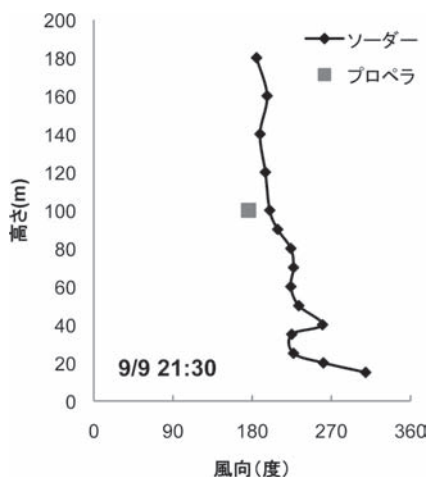
第8図a 風速の鉛直分布
(2007年9月30日 17:30)



第8図b 風向の鉛直分布
(2007年9月30日 17:30)



第9図a 風速の鉛直分布
(2007年9月9日 21:30)



第9図b 風向の鉛直分布
(2007年9月9日 21:30)

について、ほぼ同じ位置に設置した超音波風向風速温度計の観測値と比較したところ、ある特定の風向において観測値に差異が生じることが確認された。特に、超音波風向風速温度計の風向が50度近傍で風速比が極端に小さくなることが分かった。この要因として、次の2点が考えられた。すなわち、①建物の屋上にある避雷針が東北東からの風の障害となっていること、②風向と風速の感部が一体であるプロペラ型風向風速計では、気流に乱れが生じると、風速計の感部が左右に激しく動き、風速が過小評価されることが考えられた。また、風の鉛直成分が大きい場合には、水平成分しか検知しないプロペラ型風向風速計では観測値が小さくなることが考えられた。

また、ケーブルカー山頂駅付近に設置したドップラーソーダーの観測値との比較では、現在のプロペラ型風向風速計の設置高度では山体の影響を受けている可能性があり、一般風の観測値として利用するのは充分注意をする必要のあることが分かった。

今回の解析結果から、筑波山山頂で上空の大気を代表する風を正確に観測するためには、現在の設置高度を上げるか、または風向変動に左右されない超音波風向風速温度計等の風速計を利用する必要があることが確認された。山の影響を受けない充分な高度まで観測可能なドップラーソーダー等のリモートセンシングによる風向風速の観測が理想的である。

謝辞

観測場所の提供を快く承諾して下さった筑波山神社、電源の便宜をはかり、機器の監視をしていただきました筑波観光鉄道株式会社に感謝いた

します。また、ドップラーソーダーの設置には、筑波大学生命環境科学研究科の野林 暁氏と松岡 諒氏の協力を得ましたので感謝いたします。

文献

- 花房龍男 (2003): リモートセンシングによる風観測. 日本風工学会誌, **94**, 3-11.
- 花房龍男・加藤真規子・高橋俊二・伊藤芳樹・青木和久・竹内清秀 (1994): ドップラーソーダーの複雑地形上における観測値について. 第13回風工学シンポジウム論文集, 43-48.
- 花房龍男・大和佳祐・渡来 靖 (2007): フラット・アレイ型ソーダーについて. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **8**, 27-33.
- 光田 寧 (1970): 種々の風速計の比較について. 京都大学防災研究所年報, 第**13**号A, 219-226.
- Businger, J.A., Miyake, M., Inoue, E., Mitsuta, Y. and Hanafusa, T. (1969): Sonic anemometer comparison and measurements in the atmospheric surface layer. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **47** (1), 1-12.
- Hanafusa, T., Kato, M. and Takahashi, S. (1995): Wind measurement of Doppler Sodars over complex terrain. *Pap. Meteorology and Geophysics*, **46** (3), 67-84.
- Hayashi, Y. and Research Group for Intramural Project (S) (2006): Meteorological observation station at the summit of Mt. Tsukuba. *Tsukuba Geoenvironmental Science*, **2**, 19-24.

(2008年6月25日受付, 2008年8月13日受理)