

## 中立に近い大気境界層での風速変動

### Wind Variation in the Near-Neutral Atmospheric Boundary Layer

堀口光章

Mitsuaki HORIGUCHI

#### Synopsis

Wind variation in the near-neutral atmospheric boundary layer (ABL) observed by the wind profiler of the Japan Meteorological Agency were investigated. The measured data at Nagoya Local Meteorological Observatory were used for the study of ABL wind in the large plane. In the daytime, the decrease of wind speed in the morning and the subsequent increase of them in the afternoon were observed in the ABL. From the diurnal change of the wind profile, we infer that turbulent mixing and the resultant downward transfer of momentum in the daytime can reduce the vertical wind shear. Wind variation in the time scale of 30 to 60 min is also found in the period of wind intensification.

**キーワード:** 大気境界層, 風速変動, ウィンドプロファイラ, 乱流混合

**Keywords:** atmospheric boundary layer, wind variation, wind profiler, turbulent mixing

#### 1. はじめに

地表から高さ 500 m~2 km 程度までの大気層である大気境界層で吹く風は、一日の中でも多様な原因によって変動しており、その変動の時間スケールも数十秒から数時間以上まで大きな幅がある。ここでは接地境界層での安定度が中立に近いと考えられる場合を対象とし、周囲の地形の影響を受けにくい比較的大きな平野内での大気境界層における風速変動の様子を調べることを目的としている。そのために、気象庁設置の風車型風向風速計による地上での風の観測値とウィンドプロファイラによる上空の風についての観測データを使用する。

#### 2. 気象庁ウィンドプロファイラの概要

気象庁は 2001 年 4 月からウィンドプロファイラによる高層風の定常観測を開始し、この観測網は「局地的気象監視システム」(略称: ウィンダス WINDAS, Wind Profiler Network and Data Acquisition System) と名付けられている(加藤ら, 2003)。2018 年現在、

気象庁によるウィンドプロファイラは全国 33 か所に設置されている。このウィンドプロファイラは、対流圏を対象として周波数 1357.5 MHz (波長約 22 cm) の電波を使用し、地上から上空に向けて電波を発射して空気の屈折率のゆらぎにより散乱され戻ってくる電波の周波数変化(ドップラーシフト)から上空の風を測るリモートセンシング機器である。

観測データについては、高度約 300 m 間隔で、風の東西成分、南北成分、鉛直成分と S/N 比(信号のノイズレベルに対する比)が得られる。また、降水があるかどうかなど気象条件により変化するが通常数 100 m から数 km の高さまで観測される。観測データは、10 分平均された値として記録、配信されており、この報告では、京大大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースによって収集・配布されたもの(<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>)を使用している。

### 3. 観測例

冬季で季節風が強く吹き、安定度が中立に近いことが多いと考えられる2016年1月12日から2月12日にかけて、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー（京都府京都市伏見区）において、大気境界層乱流の集中観測が行われた（堀口ら，2017）。ここでは、気象観測塔に設置された超音波風速計（高さ25 m）による乱流観測，ドップラーライダーによる大気境界層下層の風の観測（高度220 mまで），1時間半から2時間おきのラジオゾンデによる風と気温などの高度分布の観測（二日間のみ）が行われた。

宇治川オープンラボラトリーではドップラーライダーなどにより日中午後の風速の強化の様子が観測されたが、大気境界層全体にわたる風速の詳細な時間変化は調べられていない。そのためにウィンドプロファイラによる観測が有用であると考えられるが、京都にはウィンドプロファイラが設置されていない。そこで、同じ時期について、場所は異なるが気象庁名古屋地方気象台（愛知県名古屋市千種区）にお

けるウィンドプロファイラ（北緯35度10分，東経136度58分）による観測とその場所での地上気象観測により、大気境界層全体にわたる風の状況の例を調べることにする。

名古屋地方気象台は、広い平野である濃尾平野の東寄りの場所に位置している（Fig. 1）。北西からの風の場合、平野を囲む山々（高い山で山頂の標高は千数百メートル程度）からはかなり離れていて（40 km程度）、平野上を長く吹いてきた風を観測できる。また、濃尾平野の東に広がる高台の端に気象台は位置しており、その標高は51 mで、周囲の大きな建物などによる影響も小さいと考えられる。ウィンドプロファイラは気象台の敷地内に設置され、また地上気象観測用の風車型風向風速計は、気象台建物（本庁舎）の屋上に設置（風向風速計の高さは地上高17.9 m）されている。なお、以降において、他の気象官署における観測も含めて風向風速計による観測値は気象庁ホームページ（<http://www.jma.go.jp/jma/>）に掲載されているデータを使用している。

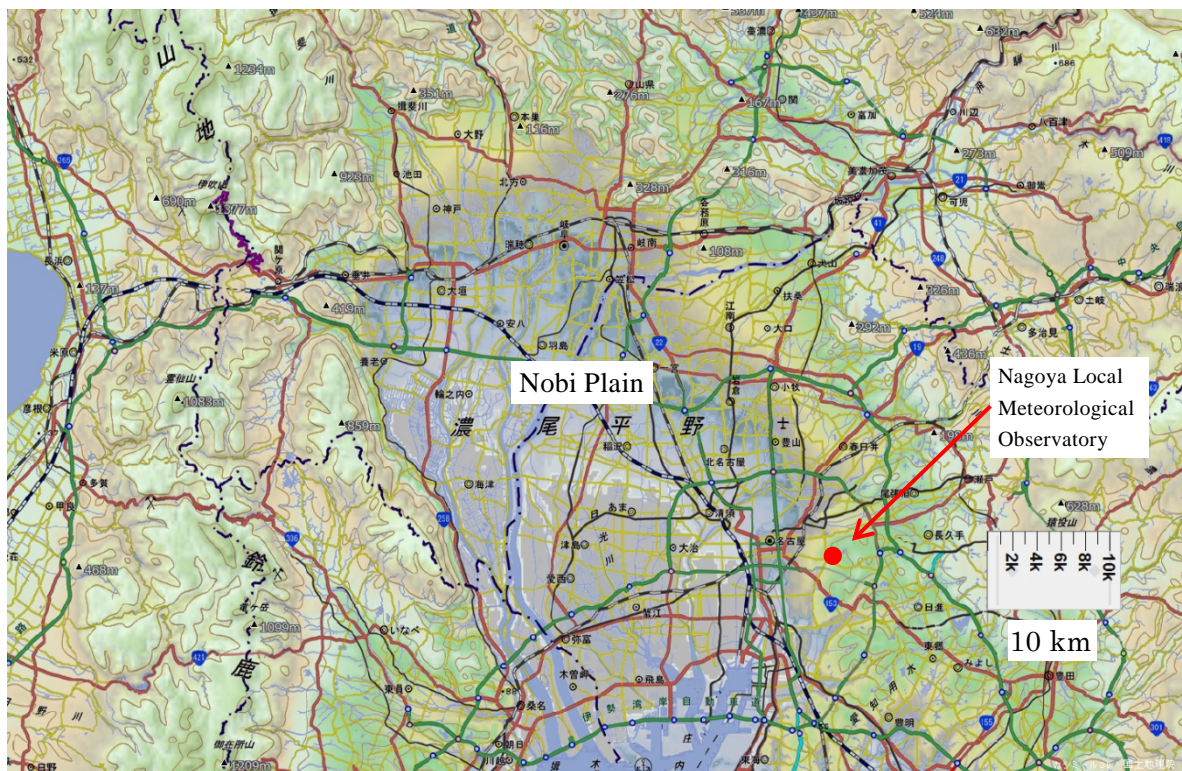


Fig. 1 Map around Nagoya Local Meteorological Observatory. This map was made by the software “Kashmir 3D”.

宇治川オープンラボラトリーでの観測のうち、ドップラーライダーによる観測が順調に行われ、また比較的風が強く日中後に風速の強化が見られた2016年2月10日についてウィンドプロファイラの観測データを調べることにする。この日について、ウィンドプロファイラによる風（水平風速）の観測結果をFig. 2に示す。図中の濃い青色の領域は、観測データが得られていない高度を示している。この図を見ると、夕方頃まで、2 km程度の大気境界層を越えると考えられる高さまで観測データが得られている。その後、夜になると、観測データがあまり得られていない。

地上での風速、およびウィンドプロファイラによる日中において大気境界層内と考えられる高度（582 mと873 m）と大気境界層最上部あるいはその上の自由大気内と考えられる高度（1,747 m）での水平風速の時間変化をFig. 3に示す。なお、図に示した高度以外に、873 mと1,747 m間の高度でも風速は測定され

ているが、全て表示すると線が重なり合って区別しにくいため、代表的な高さでの測定値のみを示している。

この日、地上での風向は一日中、西から北の範囲（西～北の方向から吹く風）であった。Fig. 3を見ると、地上での風速は日中後に強くなっており、13時30分までの10分間平均風速で $9.5 \text{ m s}^{-1}$ に達し、夕方まで風の強い状況は継続している。ウィンドプロファイラによる観測から測定高度582 mと873 mにおける風速の時間変化を見ると、午前中に（10時ごろから）風速が弱くなり、その後、正午少し前から夕方までは風速が増加している。582 mと873 mでの風速を比較すると、10時半頃以降は風速差が小さくなり、その後夜までその傾向は続いている。また、17時頃には、高度1,747 mでもその下の高度と同じような風速値を示すようになる。

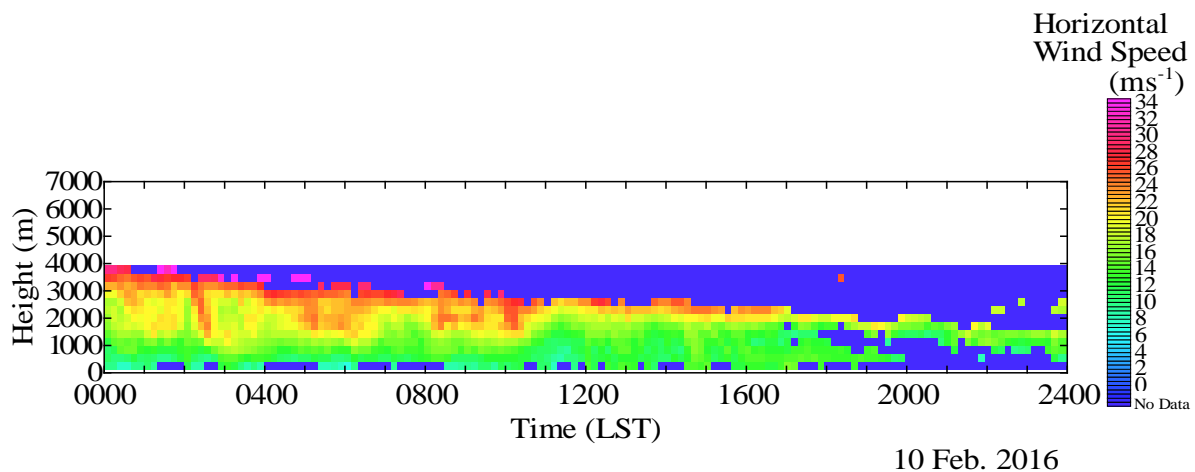


Fig. 2 Horizontal wind speed observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 10 February 2016.

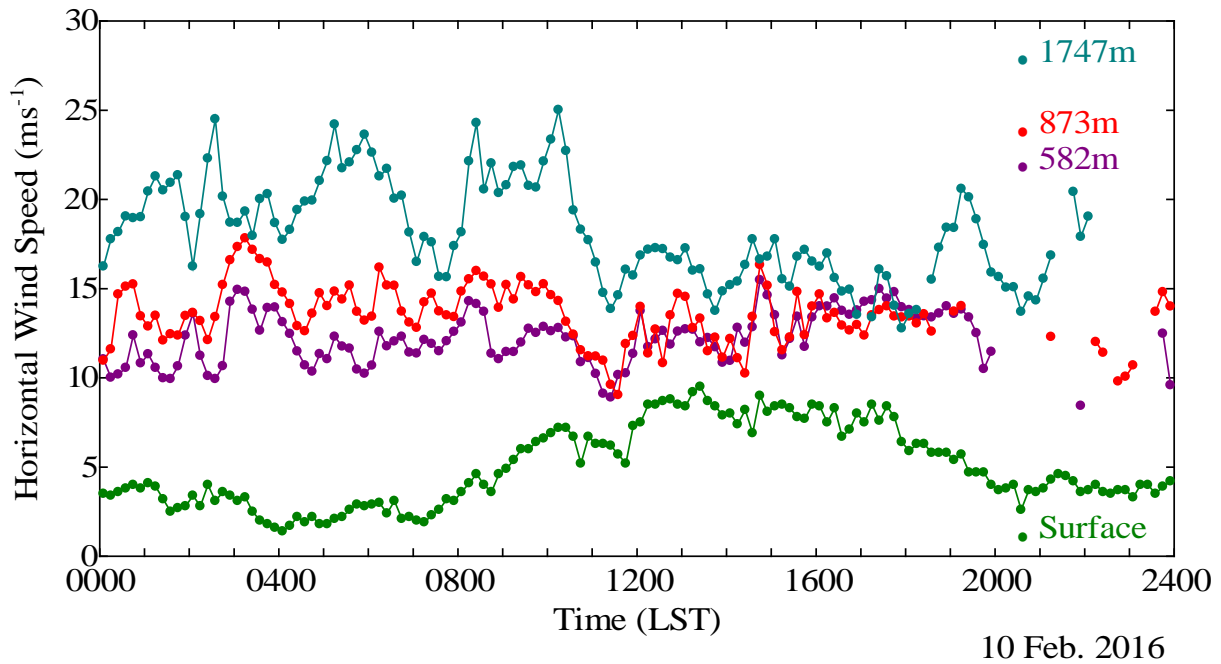


Fig. 3 Variation of horizontal wind speed at the levels of 582, 873, and 1747 m observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 10 February 2016. Horizontal wind speeds measured by a windmill anemometer at the surface are also shown.

名古屋で観測された大気境界層内での日中における風速変化は、Crawford and Hudson (1973) が示した一年間の観測データを平均した米国、オクラホマシティのテレビ塔上部（最も上の高さは445 m）での風速変化と良く似ている。今回の解析の冬季で比較的风が強く中立に近いと考えられる状況においても、Crawford and Hudson が示唆したように、日中での（鉛直方向の）運動量輸送が風速の高度分布、さらには地上での風速に影響していることが考えられる。ただし、Crawford and Hudson は、一年にわたる観測データを使用しており、風速の変化をもたらす運動量輸送は対流混合によるものと考えた。一方、この報告に使用した名古屋での冬季の状況では、対流は活発ではなく、乱流による混合が主要であると考えられる。

日中での同様な風速変化は、同じ名古屋の2016年1

月24日の例でも見られる (Fig. 4)。この日も、地上での風向は一日中、西から北の範囲であり、日中での地上の風速は正午頃にかけて強くなっていて、12時30分までと12時40分までの10分間平均風速で9.8 m s<sup>-1</sup>に達し、夕方まで風の強い状況が継続した。ウィンドプロファイラによる測定高度582 mと873 mにおける風速の時間変化については、2月10日の例と同様に午前中に風速が弱くなり、その後、正午頃から14時半頃までは風速が増加している。また、13時少し過ぎ頃から14時頃には、高度1,747 mでも同じような風速値を示すようになることが分かる。この日の例については、2月10日の例に比べ午後の早い時間に大気境界層での風速増加が見られなくなるという違いがある。



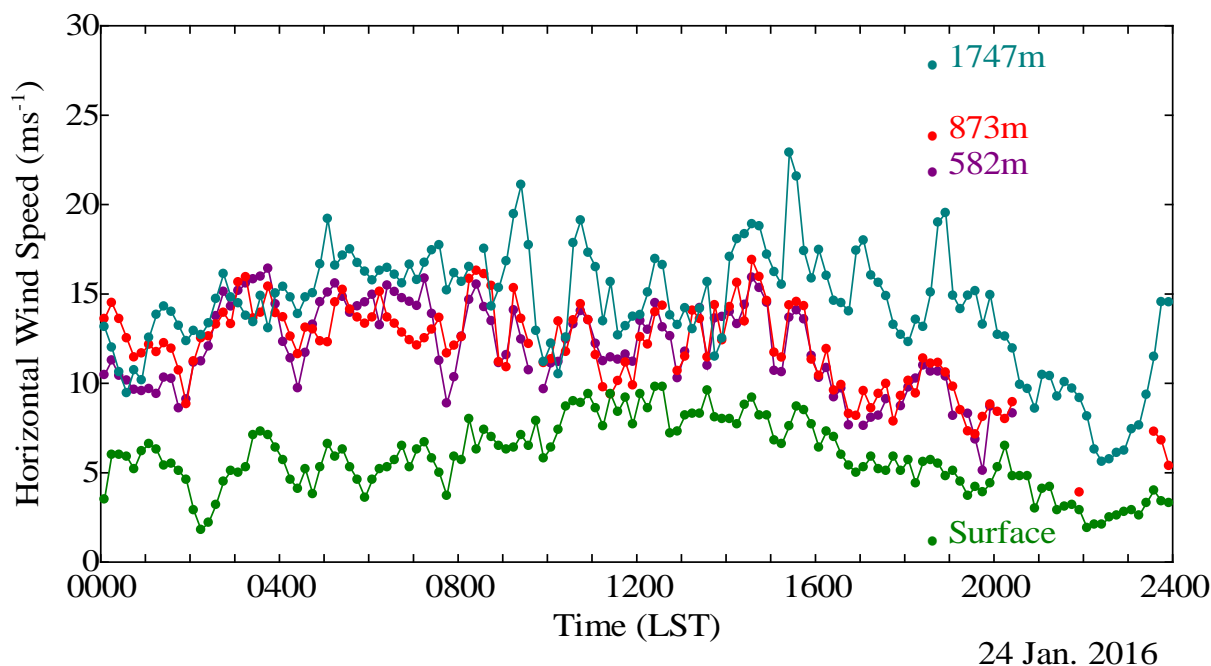


Fig. 4 Variation of horizontal wind speed at the levels of 582, 873, and 1747 m observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 24 January 2016. Horizontal wind speeds measured by a windmill anemometer at the surface are also shown.

次に、風速高度分布の形が日中にどのように変化しているかについて調べる。Fig. 5に2016年2月10日の例について、午前中から午後にかけての代表的な時刻（宇治川オープンラボラトリーで2月2日と3日にラジオゾンデ観測が行われた9時、10時30分、12時、14時、16時）でのウィンドプロファイラ観測による風速高度分布を示す（折れ線グラフ）。図では、合わせて地上での風車型風向風速計による風速値も示している（一番下の◆印）。それぞれ、風速値は図に示した時刻からの10分平均値である。

Fig. 5を見ると、地上での風は日中の時間において、午前中から午後にかけて次第に風速が増加している。ウィンドプロファイラによる観測での最低高度である高度291 mでの風速を見ると、データが得られていない時間もあるが、午前中（9時、風速 $9.8 \text{ m s}^{-1}$ ）より正午（12時、 $14.3 \text{ m s}^{-1}$ ）あるいは日中午後のおそい時間（16時、 $13.3 \text{ m s}^{-1}$ ）の方が風速が強くなっている。また、この上の高度の582 mでの風速を見ると、14時にいったん風速が弱くなっているが、午前中（9時、10時30分）より12時あるいは16時の方が風速が強くなっている。一方、さらに上の高度での風について見てみると、高度1,164 mと1,455mでの風速は、午前中より12時の方が弱く、午後の時間では一層弱くなっている。その高さ程度より下方の層が大気境

界層であると考えると、下層での風速強化と合わせて、大気境界層全体での風速鉛直シアーが午後、それも日中の午後おそくの時間にかけて小さくなっていることになる。

風速高度分布の時間変化より、日中に大気境界層が上空へと発達し、鉛直方向への乱流混合による運動量輸送によって風速の高度分布が高さ方向に一様な分布へと変化したものと考えられる。名古屋地方気象台の位置での観測は、風上の場所での風速高度分布の変化の結果を見ており、ここでは主に平野上で運動量輸送による風速の一様化が起きていたものと推測される。また、この風速の一様化は、地表近くでの風速の強化をもたらしている。

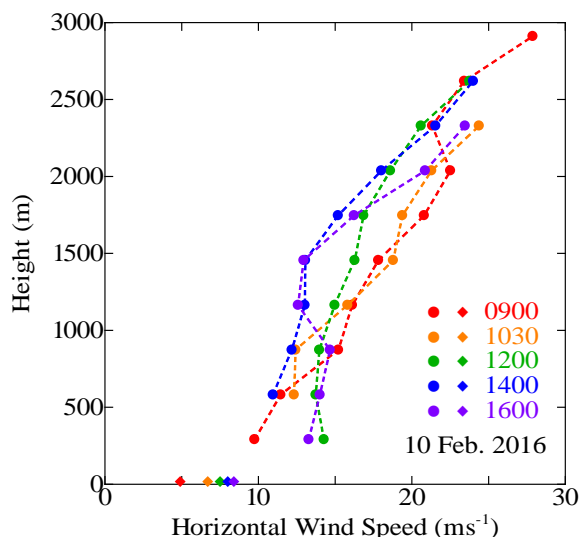


Fig. 5 Vertical profiles of horizontal wind speed observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 10 February 2016. Horizontal wind speeds measured by a windmill anemometer at the surface are also shown.

大気境界層内で午前中に風速が弱まり午後は風速が増加する傾向は、同じ日について調べた気象庁熊谷地方気象台（埼玉県熊谷市）のウィンドプロファイラ（北緯36度9分，東経139度23分）による風速時間変化でも見られる（Fig. 6）。熊谷地方気象台は関東平野の北東部に位置しており（標高30 m），その場所は南西側の山地に近く，大気境界層構造の変化に関する風速変動を調べている今回の解析にはあまり適していないことも考えられる。しかし，広い平野に位置していることから，比較参照のためにこの場所での観測データも調べることにする。同じ関東平野内には水戸地方気象台（茨城県水戸市）にもウィンドプロファイラが設置されているが，この場所も山地に近く，大気境界層構造の変化に伴う風を調べるのにはあまり適していないと考えられる。

熊谷における地上での風速（風向風速計の設置高さは地上高16.8 m）の日中での変化を見ると，午前中の8時半頃から午後にかけて次第に強くなり，14時50分までの10分間平均風速で9.0 m s<sup>-1</sup>に達し，夕方まで風速の強い状態が継続している。なお，風向については，1日中ほぼ西北西から北の風であった。

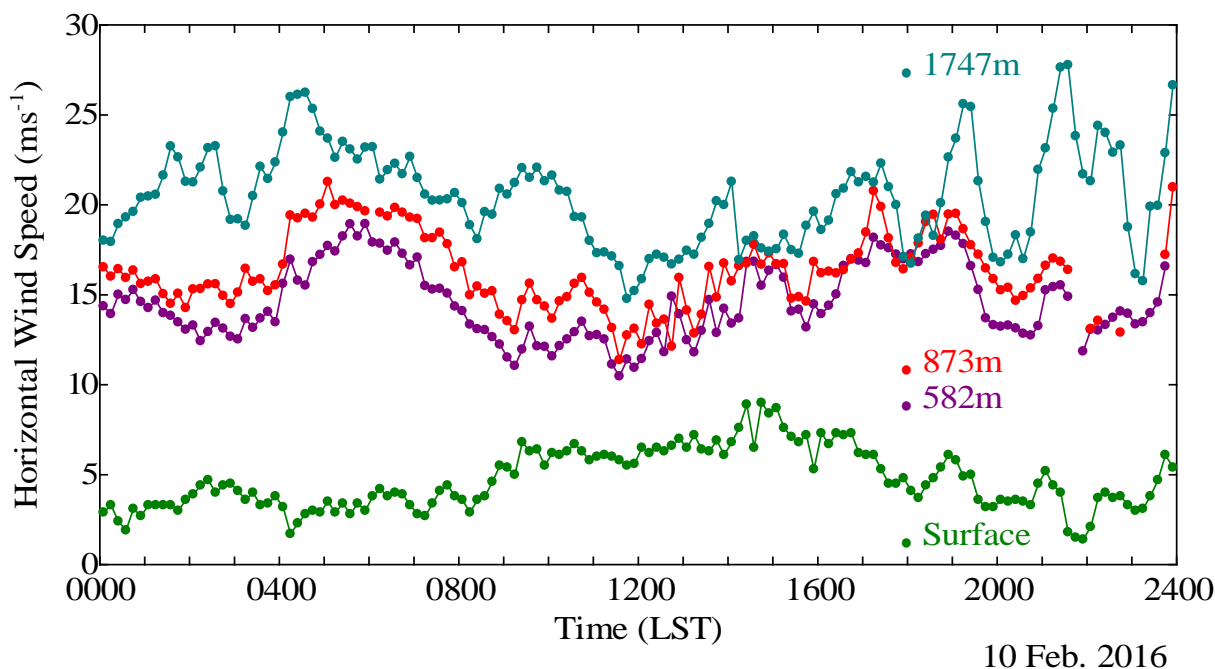


Fig. 6 Variation of horizontal wind speed at the levels of 582, 873, and 1747 m observed by a wind profiler at Kumagaya Local Meteorological Observatory on 10 February 2016. Horizontal wind speeds measured by a windmill anemometer at the surface are also shown.

熊谷での上空の風（582 m と 873 m）については、11 時半頃まで弱くなり、その後次第に風速が強くなっている。また、その 2 高度での風速差は 12 時頃以降小さくなっている。さらに高い 1,747 m での風速も、12 時少し前まで午前中は弱くなり、午後には次第に風速が強くなるという変化を示している。

名古屋でのウィンドプロファイラによる大気境界層中での風速の時間変化については、日中午後の風速増加中に 30 分から 60 分程度の時間スケールの風速変動も見られ、Fig. 3 に示した 2 高度（582 m と 873 m）では同じような時間に風速が強くなっているの、鉛直方向に拡がりを持った現象であることが分かる。同じ 2 月 10 日に宇治川オープンラボラトリーでのドップラーライダーによる大気境界層下層についての観測で、測定高度の 40~220 m 全体にわたる強風層が日中午後、数 10 分程度の時間間隔で出現している様子が調べられている（堀口ら、2017）。二つの場所（名古屋、京都）で大気境界層内でも観測されている高さが異なるが、風速変動として同じような時間スケールでの現象が起きていることが分かる。

名古屋での大気境界層最上部あるいは自由大気内と考えられる高度（1,747 m）での風速の時間変化を見ると（Fig. 3）、一日を通して 1~3 時間程度の時間スケールの風速変動が見られる。そのスケールの風速変動については、日中午後においてその下の大気境界層内の高度（582 m と 873 m）での風速とおおむね同じような時間帯に風が強くなっている。11 時から 18 時の時間について、高度 582 m と 1,747 m での水平風速値の関係をそのトレンド（582 m では風速増加、1,747 m では若干の風速低下）を除去して調べると、相関係数 0.48 が得られる。大気境界層内の 1~3 時間程度の風速変動は、より大きなスケール（大気境界層を越える高さのスケール）の風速変化によりもたらされていたことが推測される。

#### 4. おわりに

気象庁ウィンドプロファイラは全国各地に設置されており、また、設置後長期にわたるデータが蓄積されている。ウィンドプロファイラは、これまで観測があまりなされていない大気境界層上部までの風が観測できることでとても有用であり、今後できるだけ多くの観測例を解析して、大気境界層における風速変動の様子について詳しく調べていく予定である。

#### 謝 辞

この報告での気象庁ウィンドプロファイラのデータは、京都大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースによって収集・配布されたもの（<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>）を使用した。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 加藤美雄・阿保敏広・小林健二・泉川安志・石原正仁（2003）：気象庁におけるウィンドプロファイラ観測業務，天気，第 50 巻，pp. 891-907.
- 堀口光章・吉田敏哉・竹見哲也（2017）：京都市近郊における大気境界層乱流—冬季集中観測結果—，京都大学防災研究所年報，第 60 号 B，pp. 491-501.
- Crawford, K.C. and Hudson, H.R. (1973): The diurnal wind variation in the lowest 1500 ft in Central Oklahoma: June 1966–May 1967, Jour. of Appl. Meteor., Vol. 12, pp. 127-132.

（論文受理日：2018年6月13日）