

平野上の大気境界層における風速変動

Wind Variation in the Atmospheric Boundary Layer over a Plain

堀口光章

Mitsuaki HORIGUCHI

Synopsis

Wind variations in the atmospheric boundary layer (ABL) over a large plane were investigated. The data observed by a wind profiler and a windmill anemometer at Nagoya Local Meteorological Observatory of the Japan Meteorological Agency were used for the study of diurnal wind variations in the season of autumn. In the daytime, the decrease of wind speed in the morning and the subsequent increase of it in the afternoon were observed in the ABL. At the surface, wind speed gradually increases and attains a maximum in the afternoon. We infer that downward transfer of momentum by the convection and turbulent mixing cause the wind variations in the ABL and at the surface.

キーワード: 大気境界層, 風速変動, 運動量輸送, ウィンドプロファイラ

Keywords: atmospheric boundary layer, wind variation, momentum transfer, wind profiler

1. はじめに

地表に近い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いる。この研究では、周囲の地形の影響を受けにくく、比較的一様な地表状態が広がる場所として大きな平野を対象とし、大気境界層における風がどのように変化するかを調べることを目的とする。そのために、気象庁の風車型風向風速計による地上での風の観測データと、同じく気象庁の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解析に使用する。今回は、中立に近い大気境界層での風速変動について調べた研究（堀口，2018）に引き続き、安定度が不安定寄りである時間を含む秋季における観測例を解析する。

2. 観測の概要

気象庁は2001年4月からウィンドプロファイラによる各地におけ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：WINDAS, WInd profiler Network and Data Acquisition System）と呼ばれている（加藤ら，2003）。このウィンドプロファイラは、電波（周波数1357.5 MHz, 波長約22 cm）を上空へ発射し、空気の屈折率の空間変動により散乱され戻ってくる電波の周波数変化から、その変動をもたらす大気の乱れが風と共に移動していると考えて上空の風を測るリモートセンシング機器である。

ウィンドプロファイラは上空5方向に電波を発射し、その上空の電波が散乱される空間での風の一様性を仮定して、風の三次元的な流れ（水平二方向、鉛直方向）を求めている。この電波の発射方向は、鉛直方向と仰角約80度の東西南北方向である。観測データとしては、高度約300 m間隔で、風速の東西成分、南北成分、鉛直成分と信号のS/N比（ノイズレベルに対する信号強度の比）が得られる。また、降雨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ている。

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>) を使用する。

ウィンドプロファイラは現在全国33か所に設置されているが、大気境界層における風に対して地形の影響が少ないと考えられる場所として比較的広い平野である濃尾平野を選び、その平野東部に位置している気象庁名古屋地方気象台（愛知県名古屋市千種区）（Fig. 1）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）（アンテナの標高51 m）と地上気象観測による風観測データを調べる。この濃尾平野東部へ北西方面から風が吹く場合、平野を囲む山地からは水平距離で40 km程度離れていて、比較的平坦な平野上を長く吹いてきた風を観測できる。

また、地上の風観測のための風車型風向風速計は気象台本庁舎の屋上（地上高17.9 m）に設置されており、地上天気状況の記録も合わせて、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参照する。その他、地上天気図についても気象庁ホームページに掲載されているものを参照する。

今回の解析では、秋季の2019年9月から11月、2020年9月から10月の期間から、名古屋地方気象台での地上での風向が一日中、西から北の範囲であった例について、ウィンドプロファイラと風車型風向風速計の観測データを調べる。

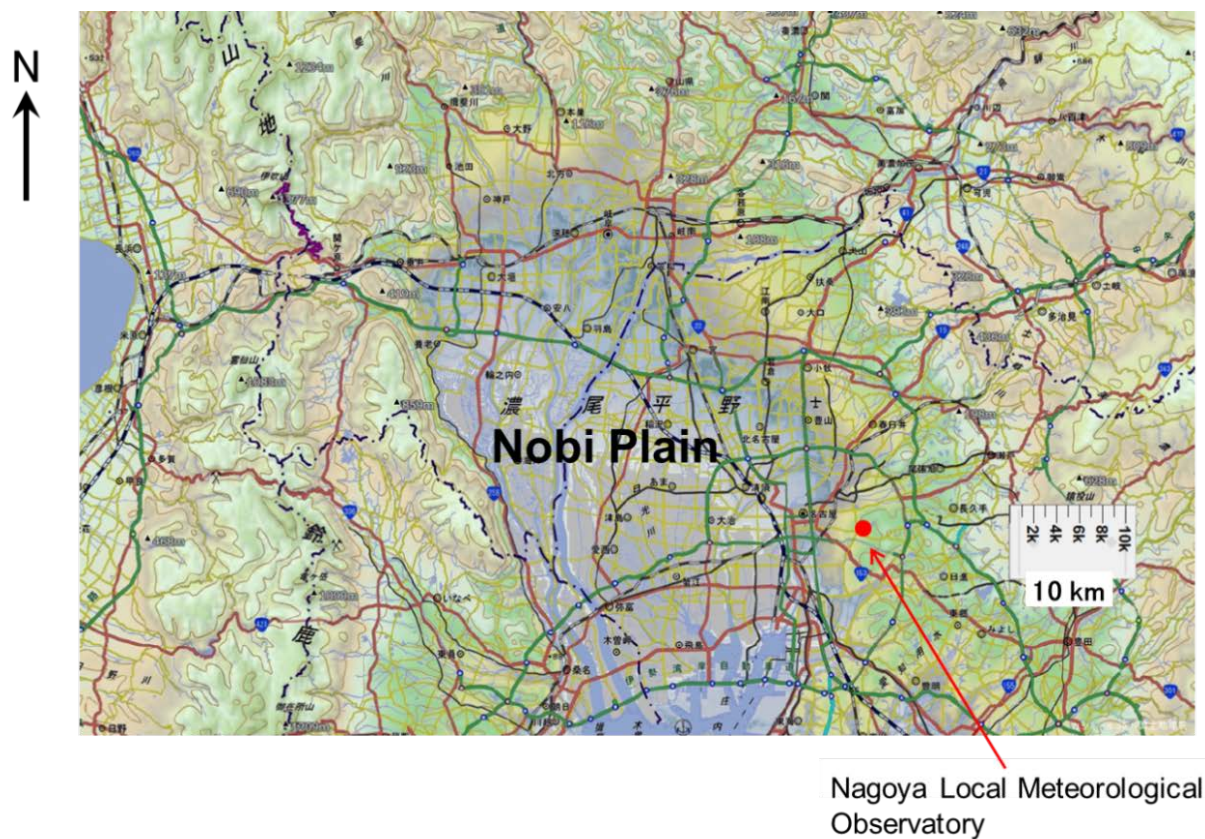


Fig. 1 Map around Nagoya Local Meteorological Observatory. This map was made by the software “Kashmir 3D”

3. 観測例

3.1 2019年9月16日の観測例

観測例として、比較的風が強く、名古屋地方気象台での地上の風向（データでは10分ごとの全方向を16に分割した平均風向）が一日中、西北西から北の範囲であった2019年9月16日について、ウィンドプロファイラと風車型風向風速計の観測データを調べる。比較的風が強い日を選んだのは、ある程度風が吹いている方が、その時間変化や高度分布を調べやすいためである。名古屋地方気象台において観測された天気は、夜の3時に曇、その後は晴あるいは快晴となった。また、この日、9月中旬の時期にもかかわらず日中の気温は高くなり、最高で34.6℃に達している。気象庁によるこの日9時の地上天気図を見ると、本州南岸（関東地方の南）付近に低気圧があり、名古屋周辺で西から北寄りの風が吹いた状況と考えられる。

大気屈折率の鉛直勾配が大きいほど電波が散乱され（加藤ら、2003）、対流圏では水蒸気量の鉛直勾配による寄与が屈折率の鉛直勾配に対して一番大きい（Tsuda et al., 2001）。従って、日中の大気境界層について考えると、上空へと混合層が発達する時、その頂部付近で電波の散乱強度が大きいことが考えられる。そこで、ウィンドプロファイラによる観測データでのS/N比（ノイズレベルに対する信号強度の比）の値から大気境界層（混合層）の厚さを推定する。なお、名古屋地方気象台設置のウィンドプロファイラのデータを調べると、最低観測高度は291 mであり、上空へはおおむね同じ291 mの高度間隔で観測値が得られている。

S/N比の値の時間高度断面図（Fig. 2）を見ると、

夜間に観測値が得られていない領域（図中で白抜きの部分）が多く見られるが、日中は比較的良く観測値が得られている。日中においては混合層の発達などと関係して大気の乱れが大きく、屈折率の鉛直勾配も大きくなって電波が良く散乱されているものと考えられる。また、正午前後の時間帯（10時頃から14時頃まで）において低い高度での観測値が得られていないが、混合層内で水蒸気量が比較的一様となり、屈折率の鉛直勾配が小さくて電波の散乱が大きい領域と考えられる。

各時間において、混合層頂部の高さを示すと考えられるS/N比が最大となる高度を調べると、午前中の9時50分から10時の時間に高度873 mであったのが、午後の13時50分から14時の時間には2620 mへと高くなっている。天気が良く暑い日であったことから、日中において混合層の厚みが増大し、混合層頂部の高さが増加したものと考えられる。なお、国立天文台ホームページ（<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/>）によれば、この日の名古屋における日の入りの時刻は17時59分である。

Fig. 3に風向の値の時間高度断面図を示す。高度291 mから1455 mまでの高さでは、午前中から午後まで、ほぼ北西から北の風向が継続していて、地上と同様の風向である。これらより上の高度（1747 m, 2038 m）では、午前中から午後の14時頃まで北東方向の風向が見られる（図中では青系統の色で示されている）。上空において、日中の早い方の時間では、その下の高さとは少し異なる風向であったことが分かる。図を見ると、さらに上空までこのような風向の領域が広がっていることが分かる。

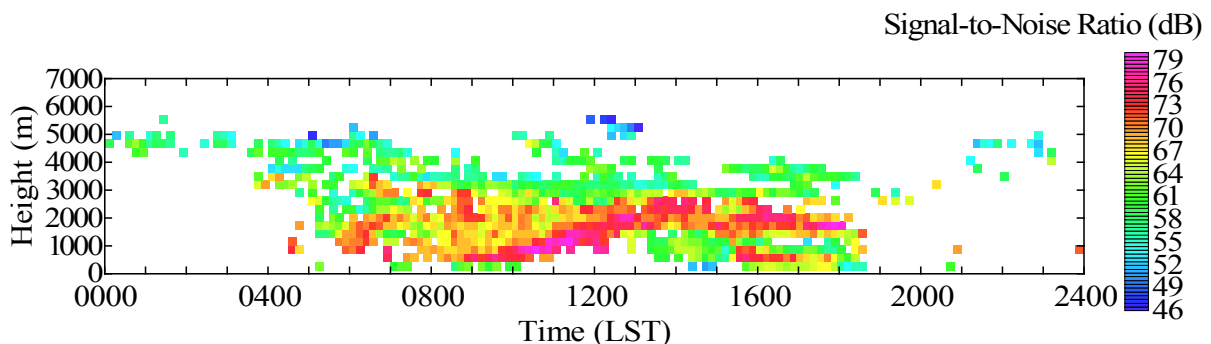


Fig. 2 Signal-to-noise ratios observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 16 September 2019.

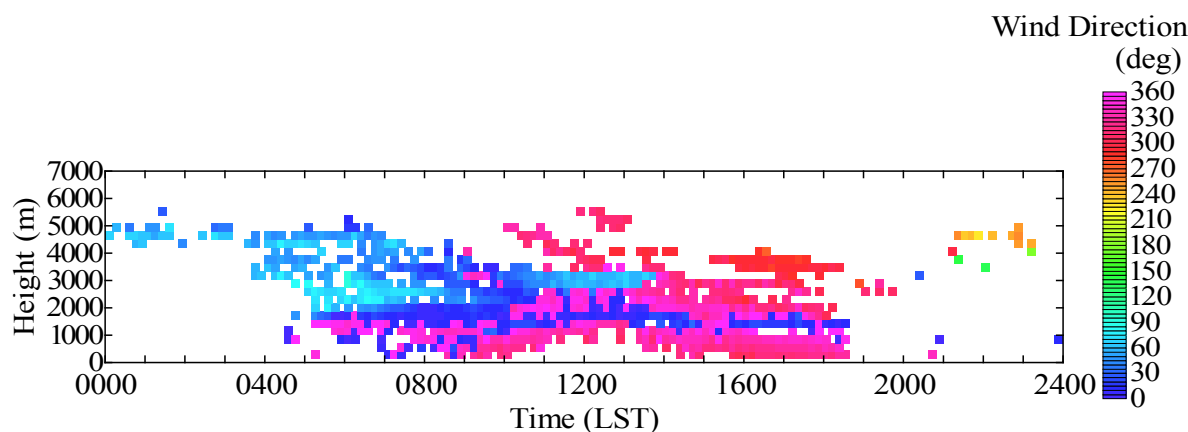


Fig. 3 Wind directions observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 16 September 2019

次いで、ウィンドプロファイラによる水平風速の観測結果をFig. 4に示す。この水平風速は、風の東西成分、南北成分の観測データより合成して得られたものである。Fig. 4を見ると、午前中の5時40分以降の時間に873 mから1747 mの高度で風速が強い領域が確認できる。最も風速が強いのは、6時50分から7時の時間における高度873 mで、風速 16.2 m s^{-1} に達している。なお、この風速は、ウィンドプロファイラにより観測された全時間、全高度での最大風速である。その後、正午前後にはそれらの高度での風速は弱くなっている。その後、15時頃より、最下層（291 m）から高度1455 mまでの高さで風速が強くなっているが、それらの高度の観測データは18時40分以降得られていない。

Fig. 5に地上とウィンドプロファイラ各測定高度における水平風速の時間変化を示す。地上（地上高17.9 m）での風速は、日中において午前中から午後

にかけて強くなっており、16時20分から30分の時間に平均風速 8.4 m s^{-1} に達している。

ウィンドプロファイラによる観測については、Fig. 5に高度582 mから1455 mまでの4高度での風速時間変化を示している。このうち、高度582 m、873 m、1164 mにおける水平風速の時間変化を見ると、午前中は風速が弱くなっていく傾向があるが、午後になって風速が増加している。午後の風速増加については、例えば高度873 mでの風速で13時40分から50分までの時間で 7.2 m s^{-1} であったのが、17時30分から40分の時間において 13.2 m s^{-1} に達している。また、それらの高度間の風速差は午後の時間において小さくなっている。

上記の1164 mまでの高さより上空の高度1455 mでは、午前中に同じように風速が弱くなるが、他の高度とは遅れて夕方の17時40分以降に風速が増加している。

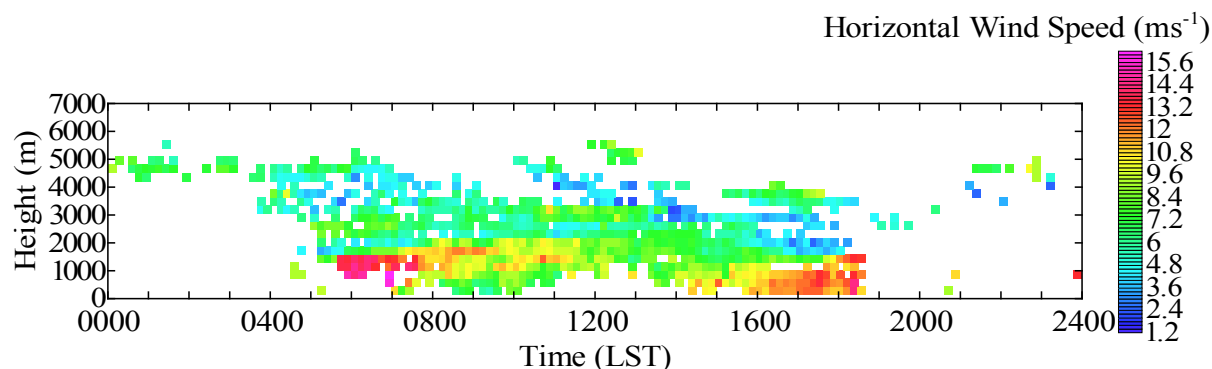


Fig. 4 Horizontal wind speeds observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 16 September 2019

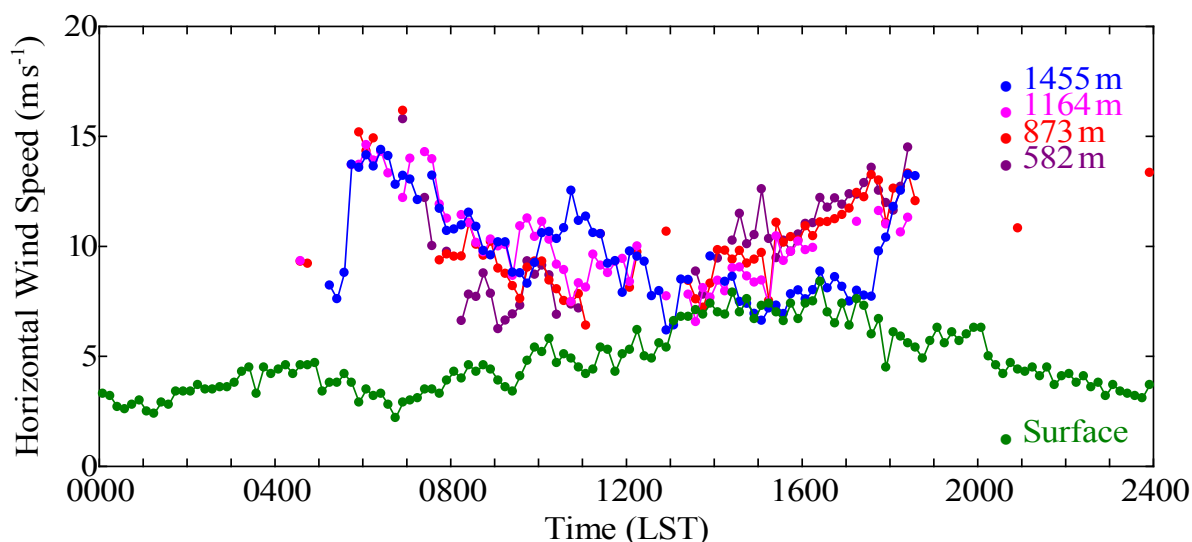


Fig. 5 Variations of horizontal wind speed at the levels of 582, 873, 1164, and 1455 m observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 16 September 2019. Horizontal wind speeds measured by a windmill anemometer at the surface are also shown.

上空の風速と地上での風速を比較すると、地上で最も風速が強くなった16時20分から30分の時間に高度291 mでの風速 (Fig. 5にはその高度で一日間で得られたデータ数が少ないため示していない) は11.9 m s^{-1} 、高度582 mでは12.2 m s^{-1} であり、地上での風速 (8.4 m s^{-1}) が上空の風速と比べてもかなり大きな値になっていることが分かる。また、地上での風速は16時30分以降次第に弱くなっているが、上空 (高度582 mなど) での風速はその後も強くなっており、風速差が次第に大きくなっている。

Fig. 5に示したうちの最も高い高度である1455 mでは、日中午後において、地上での風速とあまり変わらないくらいの風速で、その下のウィンドプロファイラによる測定高度 (1164 mなど) での値と比べてかなり弱い風速になっている時間帯 (13時頃から17時半頃) がある。地上で最も風速が強くなった16時20分から30分の時間における高度1455 mでの風速は8.9 m s^{-1} であり、地上での8.4 m s^{-1} という値よりわずかに大きい程度である。その後、前述のように、夕方の17時40分以降になってからこの高度でも風速が増加している。

Fig. 6に、日中の午前と午後の時間における例として、9時50分から10時と15時50分から16時の時間におけるウィンドプロファイラと風車型風向風速計による水平風速の高度分布を示す。図を見ると、高度1164 mでは午前と午後の時間でほとんど風速に違いがないが、この高度より上の高さでは風速が午後に弱く

なり、その下の高さでは午後に強くなっている。また、2038 mの高度まで、午前中の時間では比較的高さに対して一様な風速の強さであるのが、午後の中では風速の高度変化が大きくなって下層の方が風速が強い様子が分かる。

前述の通り、S/N比の値が最大となる高度から推定される混合層頂部の高さについて、午前中の9時50分から10時の時間に高度873 m、午後の13時50分から14時の時間に2620 mと、午後にかけてその高さが増加すると考えた。午前から午後にかけての風速変化がその高さの上下で異なる1164 mという高度は、午前中には混合層よりも上に位置し、午後には混合層内部に位置する高さであると考えられる。

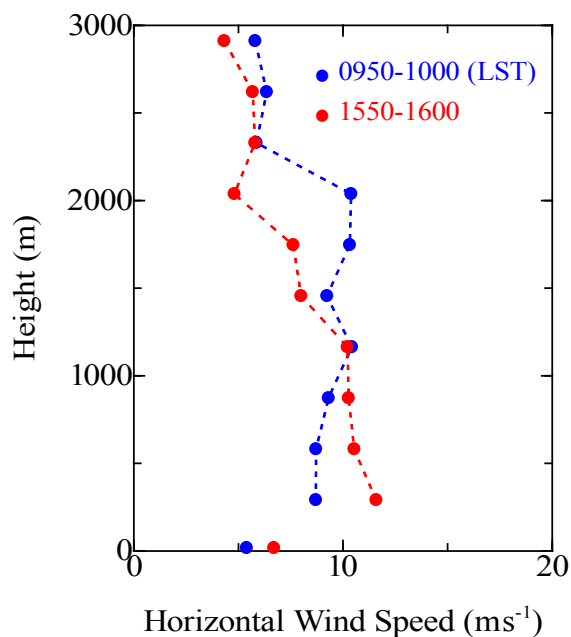


Fig. 6 Vertical profiles of horizontal wind speed observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 16 September 2019. Horizontal wind speeds measured by a windmill anemometer at the surface are also shown

名古屋における日中の風速変化は、Crawford and Hudson (1973) による米国オクラホマシティのテレビ塔（最も上の測定高度は445 m）での一年間の測定データを平均した風速変化と良く似ており、大気境界層（混合層）が上空へと発達し、対流活動と乱流混合による運動量輸送によって各高度の風速が変化したものと考えられる。なお、中立に近い大気境界層での風速変動について調べた研究（堀口, 2018）でも、名古屋で冬季に同様な風速変化が得られているが、冬季であり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た。今回の秋季の解析例では、地上での気温も高く、対流活動による寄与も大きかったものと考えられる。

午前中から午後にかけての各高度の風速変化については、次のように説明される。まず、夜間から朝にかけては、上空で風速が強い高度分布になっていたものと考えられる。そして午前中は、発達する混合層に取り込まれることで下方への運動量輸送により各高度の風速が減少するように働き、日中午後においては、さらに混合層が発達することで上方から運動量が輸送され、層内で風速が増加すると共に高さ方向に様な風速を示すと考えられる。

また、大気境界層内の風の変化に伴って、地表での風速も夕方近くになって最も風が強くなっている。

上空からの運動量輸送が地上の風速変化にも寄与しているものと考えられる。また、上空1455 mの高度では、午後に風速が増加する時刻がその下の高さに比べて遅れているが、その理由是不明である。Fig. 6に示されるように、15時50分から16時の時間で高度1455 mではその下の高さの値より風速がかなり弱くなっており、混合層内の高さでは風速が様な値に近くなるであろうという予想とは合わない結果である。

なお、今回の研究では、大気境界層を越えるような高さまでの風を調べることができており、これまでの他の研究と比べて特筆すべきところである。

水平風速の短い時間スケールでの変化について見てみると（Fig. 5）、例えば高度582 mや873 mの風速のように、1時間から2時間程度のスケールでの風速変動も見られる。

3.2 その他の日の観測例

比較のために、別の日の例として、2019年10月6日の観測結果を示す。この日、名古屋地方気象台での地上風向は、一日中、西北西から北の範囲であった。また、観測された天気は、夜の3時に曇、その後は快晴、晴、あるいは薄曇となり、この日の最高気温は28.8℃であった。気象庁によるこの日9時の地上天気図を見ると、本州の東の海上（関東地方の東）に低気圧があり、名古屋周辺で北寄りの風が吹いた状況と考えられる。

Fig. 7にウィンドプロファイラ各測定高度と風車型風向風速計による水平風速の時間変化を示す。地上での風速は、日中において午前中から午後にかけて次第に強くなっており、14時40分から50分の時間に平均風速7.6 m s⁻¹に達している。この最大値は、9月16日の例と比べて、少し低い値である。

ウィンドプロファイラによる各高度での水平風速の時間変化について見てみると、高度582 mと873 mにおいて、午前中は風速が弱くなっていく傾向があるが、午後になって風速が増加している。高度582 mでは、11時20分から30分の時間に風速5.2 m s⁻¹と弱くなり、その後風速が増加して、夕方の17時50分から18時の時間に風速12.4 m s⁻¹に達している。この風速の日中における午前の時間での減少と午後の時間での増加という傾向は、9月16日の例と同じである。夕方以降の時間についてはあまり風速データが得られていないが、高度582 mにおいて18時20分から30分の時間には10.2 m s⁻¹という値であり、もう風速は増加していないと考えられる。

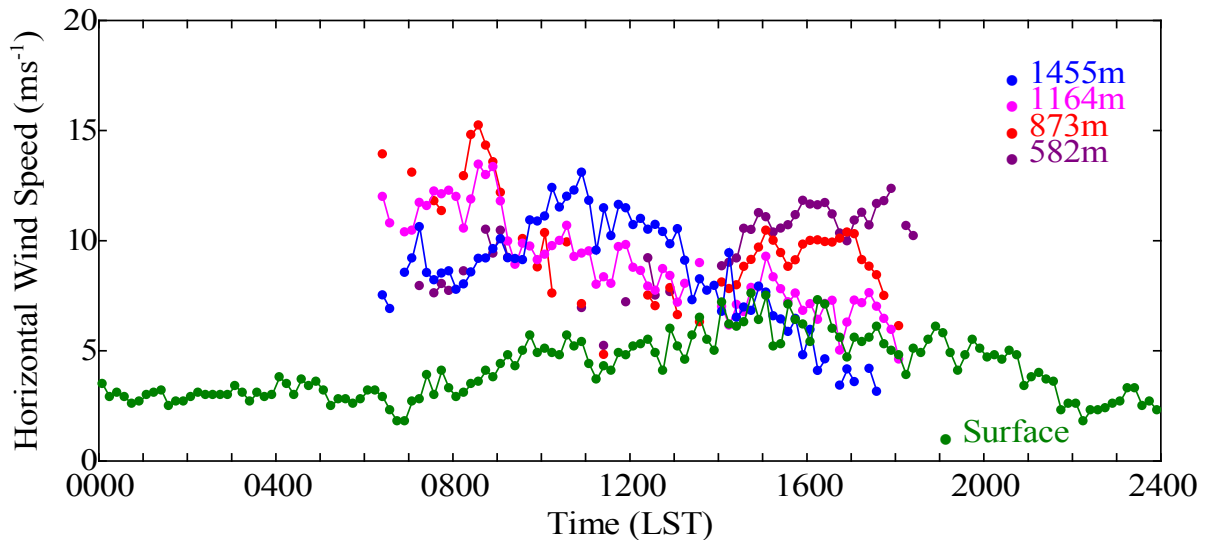


Fig. 7 Variations of horizontal wind speed at the levels of 582, 873, 1164, and 1455 m observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 6 October 2019. Horizontal wind speeds measured by a windmill anemometer at the surface are also shown

高度873 mでの風速については、日中午後のおそい時刻、17時10分以降で風速が減少している。これより上空の高度1164 mでは、午前中から午後にかけて次第に風速が弱くなっていて、午後における風速の増加は観測されていない。さらに上空の高度1455 mでは、10時50分から11時の時間に最も風速が強くなり、その後は次第に風速が減少している。これらの高度での午後の時間での風速の減少については、下層から上空へと発達する混合層に取り込まれ、下方への運動量輸送により風速が減少したことが考えられるが、9月16日の例との違いの理由は不明である。また、高度873 m と1164 mで18時10分の時間まで、高度1455 mでは17時40分までの時間しか観測データが得られておらず、その後の風速変化は不明である。

もう一つの別の日の例として、2020年9月27日の例を示す。この日、名古屋地方気象台での地上風向は、一日中、西北西から北の範囲であった。また、天気観測によれば、夜の3時に曇、その後は晴あるいは快晴となり、最高気温は27.6℃であった。気象庁による9時の地上天気図を見ると、低気圧が北海道の東

の海上にあり、名古屋周辺で西から北寄りの風が吹いていた状況と考えられる。

Fig. 8にウィンドプロファイラ各測定高度と風車型風向風速計での水平風速の時間変化を示す。地上での風速は、日中において午前中から午後にかけて次第に強くなり、16時10分から20分の時間に平均風速9.0 m s⁻¹に達している。

ウィンドプロファイラによる各高度での水平風速の時間変化について見てみると、全高度(582 m, 873 m, 1164 m, 1455 m)において、午前中は風速が弱くなっていき、午後は風速が増加するという傾向がある。この風速の日中における、午前の時間での減少と午後の時間での増加という傾向はこれまでの例と同じであるが、高い高度(1455 m)でも同じ傾向が見られる。また、午後の時間において、低い高度(582 m, 873 m)での風速の方がそれよりも上の高度での風速より強くなっている。

以上のように、同じ風向の風が吹いても、日により、日中午後の風速変化には違いが見られる。

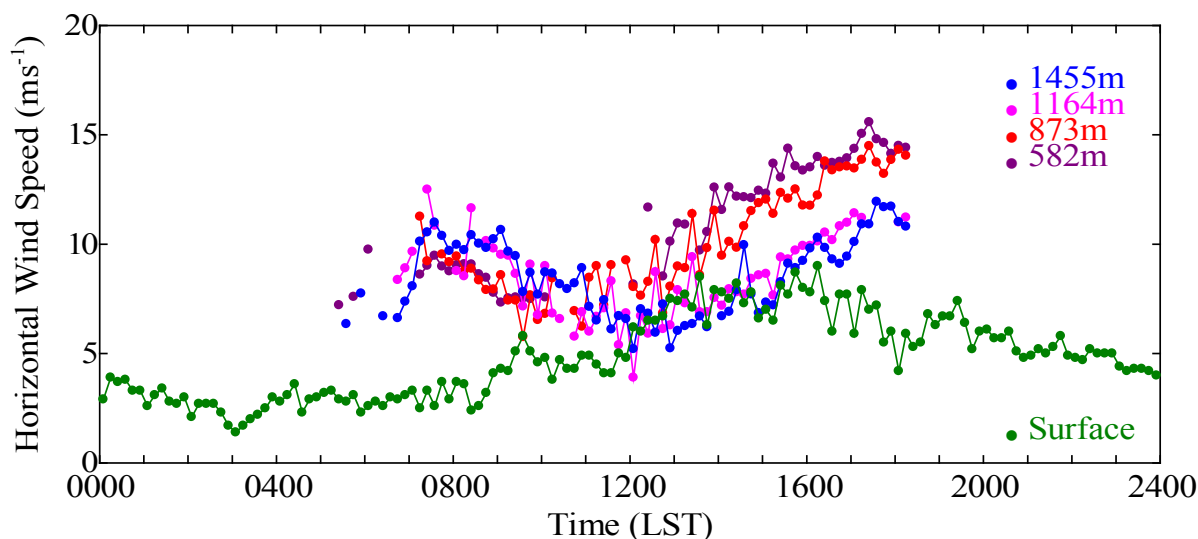


Fig. 8 Variations of horizontal wind speed at the levels of 582, 873, 1164, and 1455 m observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 27 September 2020. Horizontal wind speeds measured by a windmill anemometer at the surface are also shown

4. おわりに

ウィンドプロファイラによる観測では、大気境界層より上方の高度まで幅広い領域での風速時間変化を調べることができる。今後、より多くの日の観測例について解析を行い、平野上の大気境界層における風速変動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 (2018) : 中立に近い大気境界層での風速変動, 京都大学防災研究所年報, 第61号B, pp. 387-393.
- 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.
- Tsuda, T., Miyamoto, M. and Furumoto, J.-I. (2001): Estimation of a humidity profile using turbulence echo characteristics, *Jour. of Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 18, pp. 1214-1222.

(論文受理日 : 2021年8月31日)