

秋季における大気境界層での風速変動

Wind Variation in the Atmospheric Boundary Layer during Autumn Season

堀口光章

Mitsuaki HORIGUCHI

Synopsis

Wind speed in the atmospheric boundary layer (ABL) changes in a variety of time scales. During autumn season, stability of the ABL varies from near neutral to unstable conditions in the daytime. This certainly affects the wind near the surface. In this study, variation of the wind at two places was investigated. At the Ujigawa Open Laboratory in Kyoto City, intermittent events of large fluxes in the surface layer were observed by sonic anemometers at around midday and in the afternoon. On the other hand, at the Nagoya Local Meteorological Observatory in Nagoya City, a wind profiler shows that the difference of wind speeds at the observation levels becomes small in the morning and the wind speeds gradually increase in the afternoon.

キーワード: 大気境界層, 風速変動, 乱流輸送, 超音波風速計, ウィンドプロファイラ

Keywords: atmospheric boundary layer, wind variation, turbulent transfer, sonic anemometer, wind profiler

1. はじめに

大気境界層における風は, 様々な時間スケールでその風速や風向が変動している. 高気圧や低気圧の通過による数日スケールから, 一日ごと, 数時間から数十秒のスケールの時間まで, 長いものから短いものまで幅広い時間スケールにわたる変動があり, またそれらが重なって複雑な様相を呈している.

ここでは, 京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにおいて実施した観測結果と, 気象庁名古屋地方気象台におけるウィンドプロファイラ観測によるデータから, 2021 年秋季における大気境界層の風の変動について調べる. 秋季の日中において, 朝方は地表から上空への熱輸送が小さい状態であるが, 正午, 午後の時間にかけて地表近くの大気が熱せられ, 上空への熱輸送が大きくなり, 混合層が上空へと発達する. これに伴い地表近くの風速も変動することが考えられる.

観測を行った宇治川オープンラボラトリーとその場所における観測データを使用した名古屋地方気象

台は, 一方は近畿地方, 他方は東海地方と, 少し離れた場所に位置しているが, 以降述べるように同じ日のケースについて, 両方の観測場所周辺で日中に大気境界層 (混合層) が発達する状況であった. そこで, ここでは二つの場所における観測結果から, 大気境界層における風速変動の様子を調べることにする.

2. 宇治川オープンラボラトリーにおける観測

京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー (京都市伏見区) (北緯 34 度 55 分, 東経 135 度 45 分) (標高 11 m) において, 高さ 55 m の観測塔と露場により, 気温, 湿度, 風速, 風向, 雨量, 気圧など, 各種気象要素の連続観測が実施されている. また, 観測塔頂部 (55 m) と高さ 25 m のデッキに設置された超音波風速計により接地境界層での乱流の観測も行われている (Photo 1).



Photo 1 Observation tower in the Ujigawa Open Laboratory. Sonic anemometers at 55 m and 25 m are indicated

観測塔頂部高さ 55 m の超音波風速計については、頂部デッキの西端から北西方向に向けて取り付け金具を伸ばし、その先に測定部を設置している。また、高さ 25 m の超音波風速計については、デッキの北西端の位置に、測定部の正面（鉛直方向風速成分測定用超音波送受波器のある方向）が北を向くように設置されている。従って、両方の超音波風速計による乱流観測に際して観測塔の塔体と測器測定部の支柱などの影響が少ないのは西寄りから北寄りの風向の場合である。

宇治川オープンラボラトリーは、その場所の南側に宇治川が東より西へと流れており、また、ここより北方向に 10 km 余りに渡って広がる京都市市街地の近郊に位置している。さらに広く見ると、この場所は、京都府南部に広がる京都盆地の中央付近にあたっている。

気象観測を行っている観測塔と露場（南北 30 m、東西 50 m 程度の大きさ）のすぐ近くには、北側に（宇治川オープンラボラトリーの）実験棟の建物、東側に南北に走る高架道路、南側に宇治川の堤防がある。国際航業（株）による三次元地理空間データセットをもとに、この場所を含んで北寄りの 4 km（南北）× 2 km（東西）の面積について粗度物体の占める（平面上の）面積の全面積に対する比（ λ_p ）を求めると 0.20 という値である（Horiguchi et al., 2022）。この値は、都市における普通の 0.1 から 0.6 という値

（Grimmond and Oke, 1999）を考えるとあまり大きな値ではなく、都市近郊で、建物などが密ではない環境であることを示している。

2021 年秋季の 10 月 20 日、気圧の谷が本州の東へ通過し、京都市（京都地方気象台において、気象庁ホームページ <http://www.jma.go.jp/jma/> 参照）では、日中、晴の天気が続いた。宇治川オープンラボラトリーにおいては、観測塔高さ 55, 40, 25 m での風車型風向風速計での観測によると日中に西から北の風向が継続して、超音波風速計による乱流観測に適した条件であった。なお、国立天文台ホームページの暦計算室ページ（<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/>）によれば、この日の京都市の日の出の時刻は日本標準時で 6 時 7 分、日の入りの時刻は 17 時 16 分であった。

この日の高さ 25 m の超音波風速計による測定から 30 分ごとに求めた各種の物理量を Fig. 1 に示す。まず風向については、超音波風速計による測定（30 分ごとの平均風向）でも、ほぼ一日中、西から北の風向であった。なお、夜になってやや南寄り（風向としては南西）の風が見られるようになっている（Fig. 1, 最上段）。

次に、超音波風速計による測定から求めた接地境界層での安定度の指標 z/L （ z は測定高度、 L は Obukhov の長さ）の値の時間変化（Fig. 1, 上から 2 段目）を調べる。この指標 z/L についての詳細な定義は、例えば Horiguchi et al. (2022) に述べられている通りであるが、（静力学的に安定で）乱流による熱輸送が下向きの時には正の値、（静力学的に不安定で）乱流による熱輸送が上向きの時には負の値、浮力による乱流の生成に対して風速シアによる乱流の生成が大きい時にはゼロに近い値となる。なお、ここでは、 z/L の値がゼロに近い場合に対して（浮力による寄与が小さいという意味合いから）「中立に近い」という言葉を使用する。

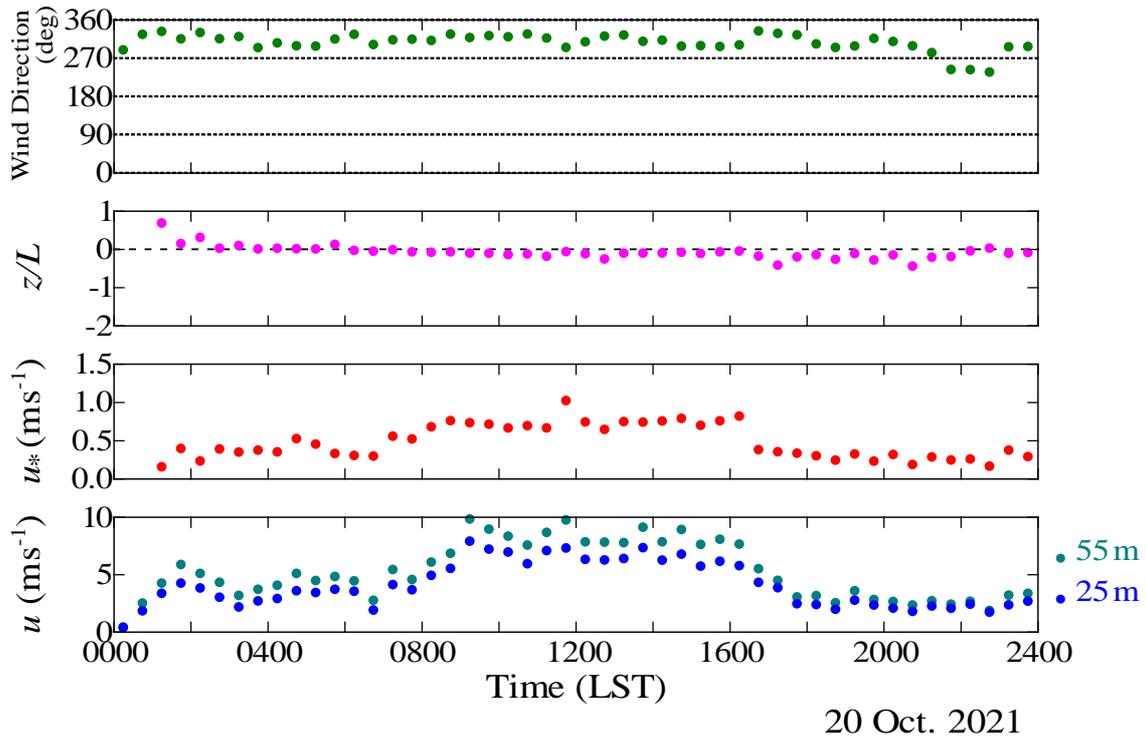


Fig. 1 Wind direction, surface-layer scaling parameter (z/L), friction velocity (u_*), and u velocity components at 55 m and 25 m for 30-min data segments on 20 October 2021

この日の z/L の値を見ると、朝方に 0 に近く中立に近い状態であったのが、日中は次第に（絶対値の大きな）負の値となり、不安定な状態へと変化している様子が分かる。そして、その後夜遅くの時間（午後 10 時～10 時 30 分）まで不安定寄りの状態が継続している。

超音波風速計による運動量輸送の測定から得られる接地境界層における代表的速度スケールの摩擦速度 (u_*) の値 (Horiguchi et al., 2022 参照) は、日中の時間に大きくなり、11 時 30 分から 12 時の時間帯に最も大きくなっている (Fig. 1, 上から 3 段目)。高さ 25 m における平均流方向風速成分 (u) の平均値について見てみると (Fig. 1, 上から 4 段目)、日中に次第に大きくなって 9 時から 9 時 30 分の時間帯に最大値 7.9 m s^{-1} に達し、午後の時間にかけて風の強い状態が継続している。ここでの平均流方向風速成分は、水平面内で 30 分ごとの平均流方向を求め、その方向の風速成分である。

その後、夕方近くの 16 時 30 分以降は風が弱くなっている。高さ 55 m における平均流方向風速成分についても同様な時間変化を示すが、9 時から 11 時 30 分と 11 時 30 分から 12 時の時間帯などでも風速が強くなっている。なお、ここでの高さ 55 m での平均流方向風速成分は、高さ 25 m での平均流方向と同

じ方向に取った風速成分である。高さ 55 m では、9 時から 11 時 30 分の時間帯に 9.8 m s^{-1} 、11 時 30 分から 12 時の時間帯で 9.7 m s^{-1} に達している。

30 分ごとの高さ 25 m での乱流による運動量と熱の鉛直輸送量を調べると、11 時 30 分から 12 時の時間帯に運動量輸送としては最も大きな下向き値、熱輸送としては最も大きな上向き値を示す (Fig. 2, 上から 3 段目と 4 段目)。なお、この図では、平均流方向風速成分と鉛直方向風速成分 (w) 間、および鉛直方向風速成分と温度 (T) 間の共分散 ($\overline{u'w'}$, $\overline{w'T'}$)

の値を表示している。ここで、 $'$ は平均値からの変動成分、 $\overline{\quad}$ は時間平均である。例えば、平均流方向風速成分と鉛直方向風速成分間の共分散の値に大気密度を掛けた値が乱流による運動量フラックスに相当している。なお、物理量が単位面積を通して単位時間に運ばれる量をフラックス (流束) と呼ぶ。

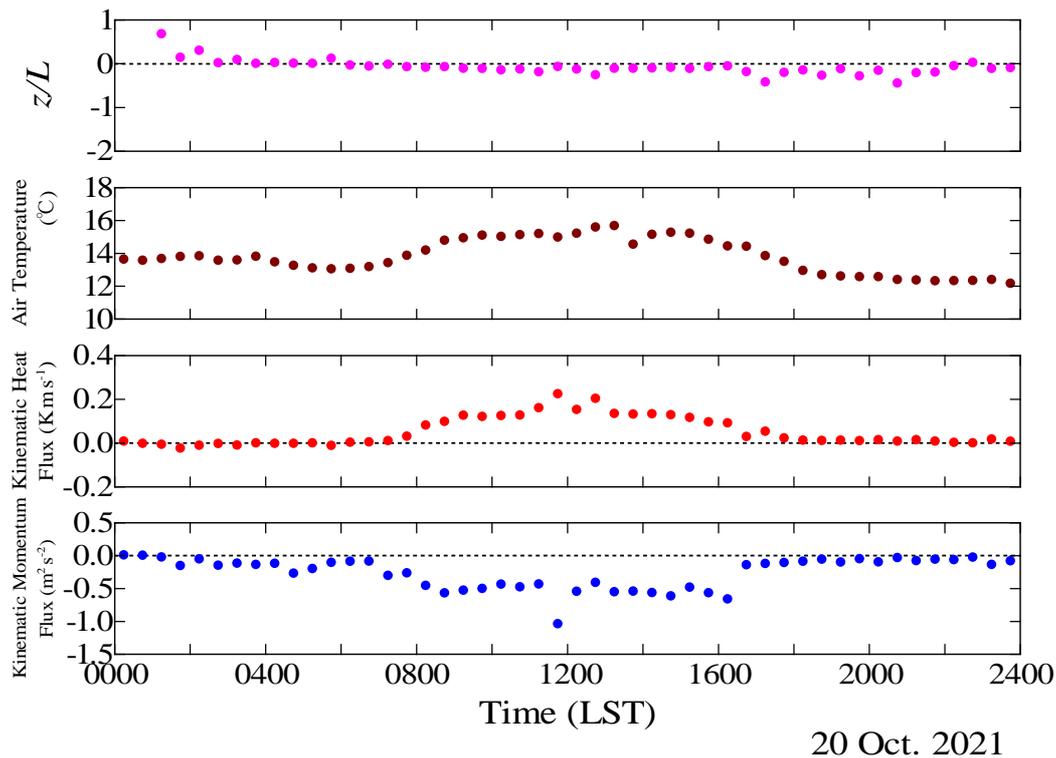


Fig. 2 Surface-layer scaling parameter (z/L), air temperature, kinematic heat flux ($\overline{w'T'}$) and kinematic momentum flux ($\overline{u'w'}$) for 30-min data segments on 20 October 2021

上記の共分散を考える際の風速成分については、その共分散の値への座標系の取り方による影響が大きいため、三次元的な平均流方向を考えて、その方向に平均流方向風速成分、平均流方向に鉛直断面内で直交する方向（上向き方向）に鉛直方向風速成分を取っている。

また、温度は、超音波風速計によって測定される音速から得られる値（音仮温度）であり、気温とは水蒸気量に依存して少し差があるが、変動成分についてはおおよそ対応しているものと考えられる。

運動量と熱の鉛直輸送について、一般的な状況について考えると次のようになる。すなわち、運動量の鉛直輸送については、上空の方が風が強い普通の状態では上空から地表へ向かって運動量が輸送される。また、熱の鉛直輸送については、日中に地表近くの大気の温度が上昇すると上空へ向かって熱が輸送され、夜間に地表近くの大気の温度が下降すると上空から地表へ向かう熱の輸送が起こるものと考えられる。

地表から上空への熱輸送に関係するものとして、気温（高さ 25 m での水晶式温度計による）についても図（Fig. 2, 上から 2 段目）中に示している。1 日

の間の時間変化を見ると、気温は 13 時から 13 時 30 分の時間帯で最も高くなっている（15.7 °C）。前記の熱輸送の時間変化と比較すると、熱輸送の方が気温より早い時間に最大の上向きの値となっている。なお、下向きの運動量輸送量と上向きの熱輸送量として最も大きな値を示した 11 時 30 分から 12 時の時間帯において、接地境界層での安定度の指標 z/L の値は -0.1 であり、大きな熱輸送量に対応して中立に近いが少し不安定寄りの値であった（Fig. 2, 最上段）。

11 時 30 分から 12 時の時間帯における高さ 55 m と 25 m での超音波風速計による風速（平均流方向風速成分 u 、鉛直方向風速成分 W ）の変動と温度（ T ）の変動の様子を Fig. 3 に示す。

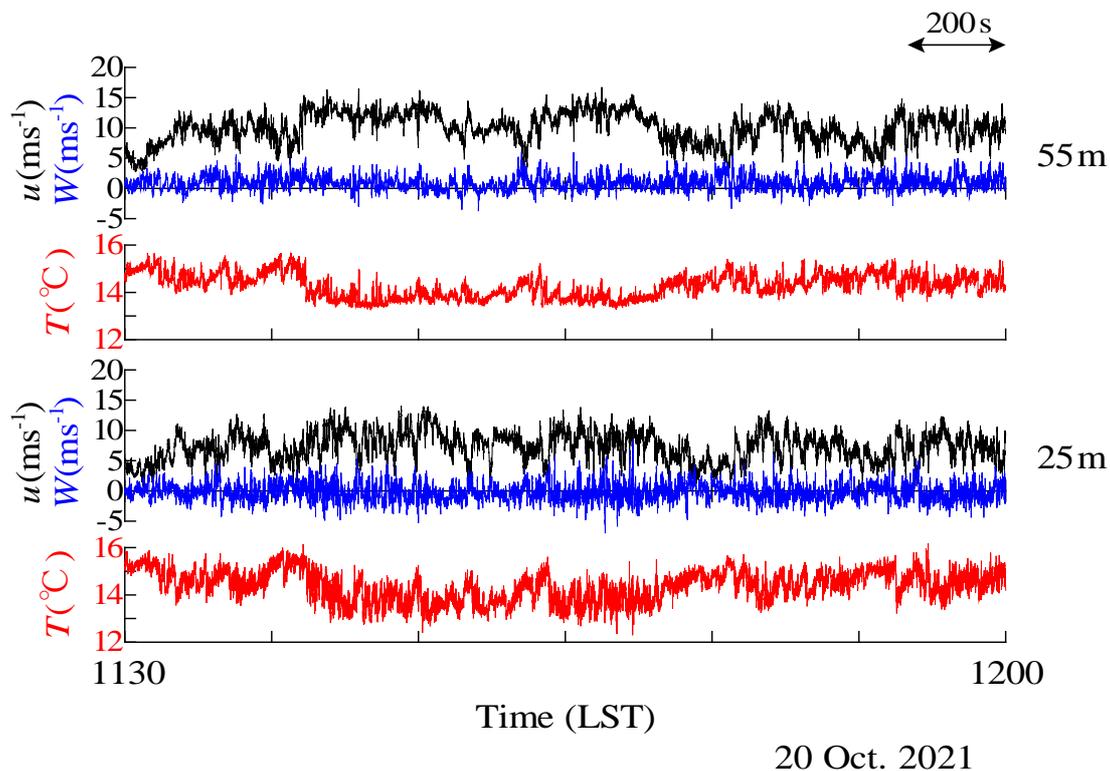


Fig. 3 Streamwise velocity component (black), vertical velocity component (blue), and temperature (red) observed by the sonic anemometers at 55 m and 25 m during 1130–1200 LST on 20 October 2021. Time length of 200 s is shown by the arrow

ここで、平均流方向風速成分は水平面内での平均流方向の風速成分、鉛直方向風速成分は三次元的な平均流方向を考えない元の測定値を示した。なお、実際のデータを比較してみると、三次元的な平均流方向を考えた場合の鉛直方向風速成分と元の測定値について、平均的な吹き上げ、あるいは吹き降ろしがあるかどうかによりその値は異なってくるが、風速変動の様相はほぼ同じである。また、温度変動については、超音波風速計による音仮温度についての変動を示している。

各高度における平均流方向風速成分の時間変化を見ると、大きな風速の変化があり、例えば高さ55 mでは最小値 2.0 m s^{-1} から最大値は 16.7 m s^{-1} に達している。時間スケールについては、300秒程度までの大きなスケールの風速変動が見られ、そのような風速変動は上下の高度（55 m, 25 m）でおおよそ同じ時間に生じている。

鉛直方向風速成分については、50秒程度の短い時間スケールの上昇流域が見られることがあり、その際には平均流方向風速成分が減少している。上昇流の大きさとしては、例えば11時44分ごろの上昇流域で 6.0 m s^{-1} と大きな上向き鉛直方向風速成分の値が測定されている。また、上下の高度での鉛直方向風

速成分の対応は、あまりはっきりしない。

11時30分から12時の時間帯では z/L の値が -0.1 と少し不安定寄りの状態であり、鉛直方向風速成分が正の値の時には温度も上昇するという対応が見られる。温度の変動幅は、上方の高度55 mで $2.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、下方の高度25 mで $3.8 \text{ }^\circ\text{C}$ と大きく、100秒程度の大きなスケールを持った温度変動も見られる。11時35分ごろの温度変動について詳しく見てみると、上下の高度でおおよそ同時に出現していて鉛直方向にも広がった構造であり、上向きの鉛直方向風速成分も見られることから、日中に大気下層が熱せられて生じる高温の上昇流域であるブリュームの構造 (Stull, 1988) と似ていると考えられる。

11時30分から12時の時間帯において、運動量と熱の鉛直輸送に寄与する平均流方向風速成分と鉛直方向風速成分の変動成分を掛け合わせた値 ($u'w'$)、および鉛直方向風速成分と温度の変動成分を掛け合わせた値 ($w'T'$) の時間変化を調べる (Fig. 4)。ここでも、三次元的な平均流方向を考えて、その方向に平均流方向風速成分、平均流方向に鉛直断面内で直交する方向に鉛直方向風速成分を取っている。

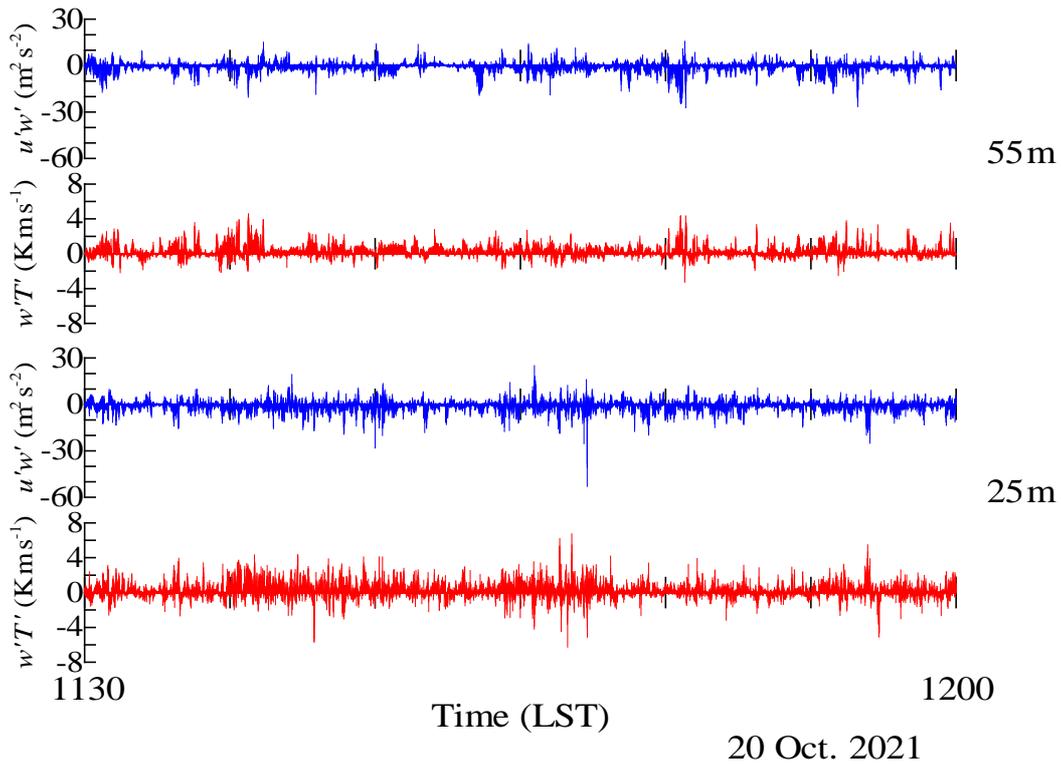


Fig. 4 The values of $u'w'$ and $w'T'$ observed by the sonic anemometers at 55 m and 25 m during 1130–1200 LST on 20 October 2021

高さ 55 m と 25 m でのそれぞれの値の時間変化を見ると、時々大きな輸送をもたらす現象が起きている。高度 25 m での 11 時 35 分から 36 分程度までの時間帯における大きな正の $w'T'$ 値（上向きの熱輸送に対応）、11 時 40 分前後での大きな負の $u'w'$ 値（下向きの運動量輸送に対応）などがこの例である。

11 時 35 分から 36 分程度までの $w'T'$ 値については、上空の高度 55 m でも大きな値が見られているが、11 時 40 分前後での $u'w'$ 値については上空の高度 55 m ではあまりはっきりした値の変化を示していない。 $w'T'$ 値についても、高度 25 m で 11 時 45 分前後に大きな正の値が見られるが上空 55 m ではあまりはっきりしないなど、 $u'w'$ 値、 $w'T'$ 値について二つの高度間での対応はあまりはっきりしないことが多いようである。

高さ 25 m と 55 m での 11 時 35 分から 36 分程度までの時間帯における大きな正の $w'T'$ 値については、Fig. 3 でプルームの構造と似ていると考えた温度と鉛直風速の変動による熱の鉛直輸送に対応していると考えられる。Fig. 2 で見たように、この 11 時 30 分からの時間帯では、平均値として大きな（下向きの）運動量輸送と（上向きの）熱輸送の値が示されているが、実際の輸送は乱流構造に伴って集中的に起きていることが示唆される。

ここまで、風速が強く、運動量と熱の鉛直輸送量が大きい 11 時 30 分から 12 時の時間帯における乱流の状況を見てきたが、別の時間帯の様子も調べることにする。そこで、この後の時間帯で、Fig. 1 に示すように高さ 55 m での平均流方向風速成分が 9.1 m s^{-1} と大きくなった 13 時 30 分から 14 時の時間帯での状況を調べることにする。この時間帯での z/L の値は -0.1 と、11 時 30 分からの時間帯と同様に、中立に近いが少し不安定寄りの状態であった。また、Fig. 2 で示されるように、下向きの運動量輸送と上向きの熱輸送がある状態であり、前後の時間と比べて大きな変化は見られていない。

13 時 30 分から 14 時の時間帯における高さ 55 m と 25 m での超音波風速計による風速変動（平均流方向風速成分、鉛直方向風速成分と温度変動の様子を Fig. 5 に示す。

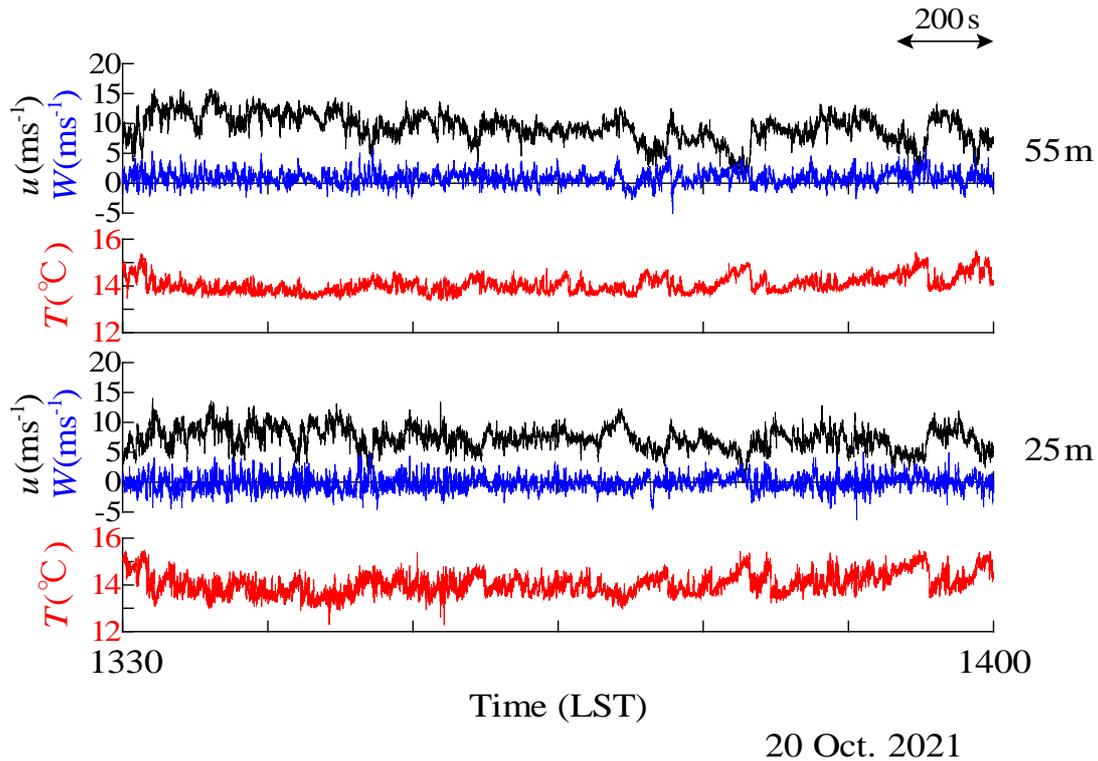


Fig. 5 Streamwise velocity component (black), vertical velocity component (blue), and temperature (red) observed by the sonic anemometers at 55 m and 25 m during 1330–1400 LST on 20 October 2021. Time length of 200 s is shown by the arrow

各高度における平均流方向風速成分の時間変化を見ると、11時30分からの時間帯と同様に大きなスケールの風速変動が見られるが、時間スケールは大きくて200秒程度である。また、大きなスケールの風速変動が上下の高度（55 m, 25 m）でおおよそ同じ時間に生じている様子も分かる。

鉛直方向風速成分については、50秒程度の時間スケールの上昇流域が見られ、その際には平均流方向風速成分が減少する対応を示している。また、上下両方の高度でおおよそ同じ時間に比較的大きなスケールの上昇流域が見られる場合もある。

温度変動については、鉛直方向風速成分が正の値の時には温度も上昇する変動が見られる。また、11時30分からの時間帯よりも、次第に温度が上昇して急激に下降するという100秒程度の時間スケールを持った変動のパターンがはっきりと確認できる。温度の上昇が一番大きくなる時刻が13時52分ごろである変動パターンがその例であり、上下の高度でほぼ同時に現れている。また、この温度の変動パターンに伴って、上昇流と平均流方向風速成分の減少が見られる。11時30分からの時間帯に関して述べたように、プリームの構造と似た乱流構造によるものと

考えられる。なお、この13時52分ごろのパターンでの温度変動は、高さ55 mで76秒間に1.4°C程度上昇している。

13時30分から14時の時間帯において、運動量と熱の鉛直輸送に寄与する $u'w'$ 値と $w'T'$ 値の時間変化を調べる (Fig. 6)。

高さ55 mと25 mでのそれぞれの値の時間変化を見ると、11時30分から12時の時間帯と同様に、時々大きな輸送をもたらす現象が起きている。特に、高さ25 mと55 mでの13時51分ごろにおける大きな負の $u'w'$ 値と正の $w'T'$ 値については、プリームの構造と似ている乱流構造による運動量と熱の鉛直輸送と考えられる。なお、上記のように、温度変動が一番大きくなる時刻は13時52分ごろである。

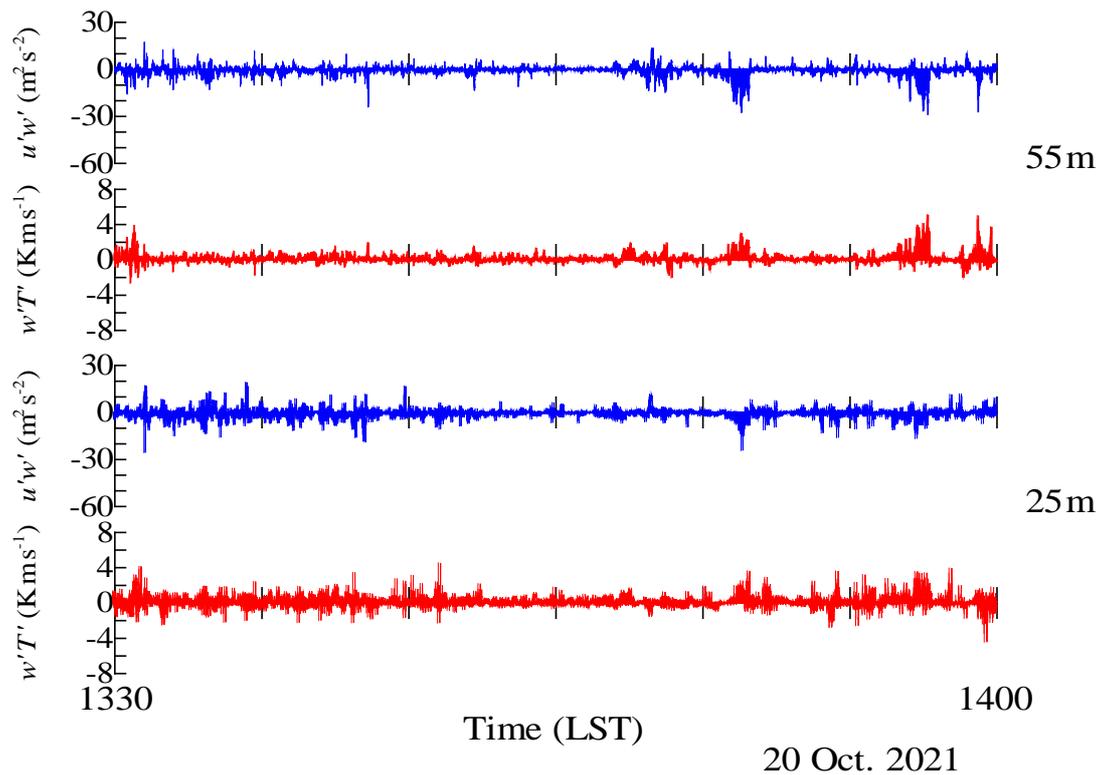


Fig. 6 The values of $u'w'$ and $w'T'$ observed by the sonic anemometers at 55 m and 25 m during 1330–1400 LST on 20 October 2021

3. 名古屋地方気象台ウィンドプロファイラによる観測データの解析

気象庁では、周波数1357.5 MHzの電波を使用したウィンドプロファイラによる上空の風観測を日本各地（全国で33か所）で行っており、大気境界層における風の変動を観測データから調べることができる。

ここでは、比較的広い平野であり、西寄りの風向の場合に周囲の地形による影響が小さいと考えられる濃尾平野の東部に位置する名古屋地方気象台（名古屋市千種区）（Fig. 7）設置の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）データを調べる。なお、ウィンドプロファイラデータの解析としては、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），および安定度が不安定寄りである時間を含む秋季（2019，2020年）における観測例を解析した研究（堀口，2021）に続くものである。

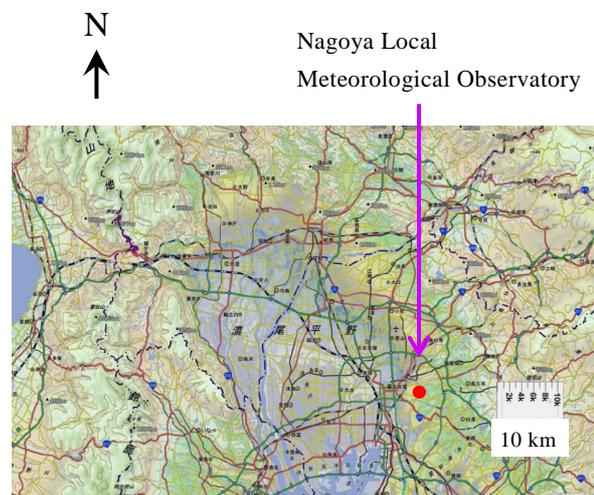


Fig. 7 Location of the Nagoya Local Meteorological Observatory. This figure was made by using the software "Kashmir 3D"

観測データは10分平均値として記録，配信されており，ここでは，京都大学生存圏研究所が運営する生存圏データベース（<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>）によって収集・配布されたデータを使用する。

このウィンドプロファイラによる観測で、地上291 mからおよそ300 mおきに、気象条件によるが高度数 kmまで、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。

宇治川オープンラボラトリーでの観測結果を調べたのと同じ2021年10月20日について、名古屋における大気境界層の状況を調べる。この日、名古屋地方気象台での天候は、夜の3時は曇、その後、晴ないしは快晴となった（気象庁ホームページ参照）。また、地上での風向（気象台地上高17.9 mの風車型風向風速計による）は、夜に西あるいは北から北北東という場合があるものの、日中においては西北西から北北西の範囲であり（気象庁ホームページ参照）、平野上の20～30 kmほどの距離を吹いてきた風を観測

していることになる。

2021年10月20日におけるウィンドプロファイラによるS/N比の値の時間高度断面図（Fig. 8）を見ると、夕方18時ごろから観測値が得られなくなっているが、朝8時半ごろからS/N比の値が大きい領域が下層より上空へと広がる様子が見られる。S/N比の値が大きい領域は、8時半ごろには600 m程度の高度であったが、11時半ごろには高度2300 m程度まで達している。天気が良い日であったことから、日中において混合層が発達し、その厚さが増大したものと考えられる。なお、名古屋地方気象台での地表気温（気象庁ホームページ参照、10分ごとの記録より）については、14時10分にこの日の最高18.6℃が観測されていて、暖かな日であったことが分かる。

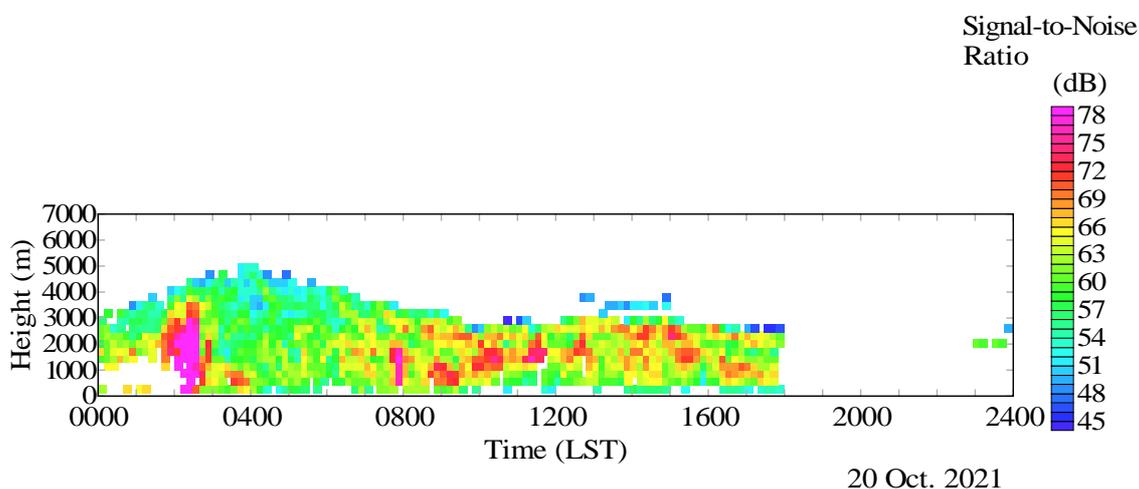


Fig. 8 Signal to noise ratio observed by a wind profiler at the Nagoya Local Meteorological Observatory on 20 October 2021

夜の1時半から3時ごろに現れるS/N比の値が大きい領域は、地上では降水の記録がないものの、上空3,500 mから地表近くまで広がっていることから、降水粒子による信号と考えられる。また、朝の8時前後に見られるS/N比の値が大きい領域も、下層から高度2,000 m程度までの広がりを持っていて、また一時的な領域であるので、混合層の発達によるものではないと思われる。

混合層の発達と関係すると思われるS/N比の値が大きい領域は、午後になって13時半ごろには高度2,600 m程度まで広がるが、15時過ぎからはそれより低い高度までの広がりとなり、16時半ごろには高度900 m程度までと変化している。

Fig. 8を見ると、混合層の発達によるS/N比の値が大きい領域（図中で赤色の領域）は1時間ほどの間隔で断続的に出現している様子が分かる。S/N比の値が

大きい領域の中心の時間として、9時10分ごろ、10時20分ごろ、11時30分ごろがその例である。

Fig. 9にウィンドプロファイラの各測定高度における水平風速（10分平均値）と地上での風速の時間変化を示す。まず地上での風速を見ると（緑色の折れ線）、9時30分からの10分間平均でこの日の最大の 9.2 m s^{-1} となり、その後、18時から10分間平均で 7.4 m s^{-1} と比較的強い風速が夕方まで継続している。地上での風の変化の状況は、宇治川オープンラボラトリーにおけるもの（2章参照）と同様であると考えられる。なお、国立天文台ホームページの暦計算室ページによれば、この日の名古屋市の日の出の時刻は京都市とは経度が異なるため、日本標準時で6時2分、日の入りの時刻は17時11分であった。日の入り後もなお風速が強いというのは名古屋における特徴のように思われる。

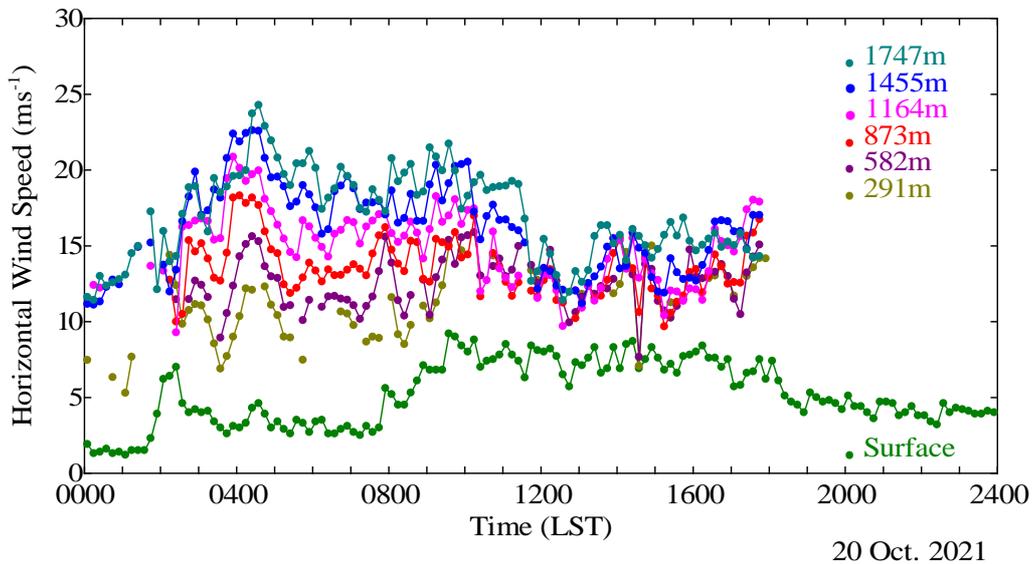


Fig. 9 Horizontal wind speeds observed by a wind profiler at the Nagoya Local Meteorological Observatory on 20 October 2021. Horizontal wind speeds measured at the surface are also shown

ウィンドプロファイラによる291 mから1,747 mまで、各高度における水平風速（10分平均値）の時間変化をFig. 9に図中で示した各色の折れ線で示す。日中の風速を見ると、朝方は各高度での風速差が大きいが、その後次第に小さくなり、12時30分ごろには、ほとんど同じ風速値になっている。例えば、朝の7時からの10分間平均で、高度582 mで 11.1 m s^{-1} 、高度1,747 mで 19.0 m s^{-1} と大きな風速差があったのが、12時30分からの10分間平均では、高度582 mで 11.2 m s^{-1} 、高度1,747 mで 11.4 m s^{-1} と風速差がとても小さくなっている。

上記の朝方から正午ごろにかけての風速高度分布の変化は、混合層の上空への発達により、大気が鉛直混合された結果と考えられる。常に風が吹いているので、鉛直混合は観測地点まで風が吹いてくる途中で起きており、観測値はその結果を示していることになる。その鉛直混合による上空から地表に向かっての運動量輸送により、下層では風速が強くなり、上層では風速が弱くなるという変化を起こしたものと考えられる。

正午ごろの時間の後、夕方の時間まで各高度の風速は次第に強くなっている。例えば、高度1,164 mの風速値について見てみると、12時30分からの10分間平均で 9.7 m s^{-1} であったのが17時30分からの10分間平均では 18.0 m s^{-1} に増加している。風速高度分布の時間変化を見るため、8時30分、12時30分、16時30分からのそれぞれ10分間における平均水平風速値の高度分布をFig. 10に示す。

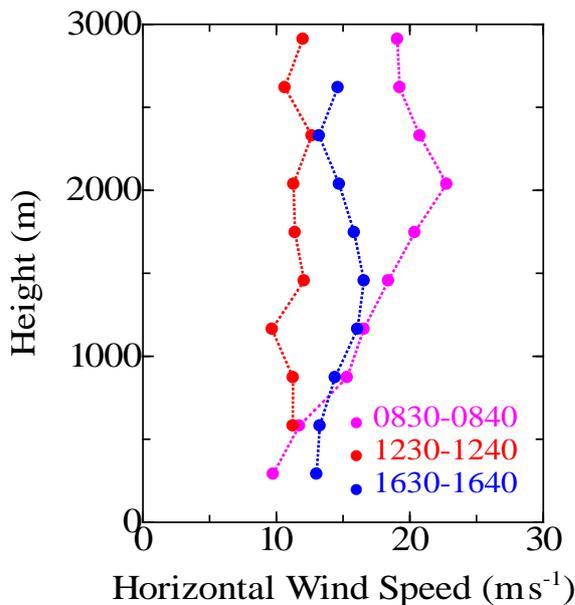


Fig. 10 Vertical profiles of horizontal wind speed observed by a wind profiler at Nagoya Local Meteorological Observatory on 20 October 2021

図を見ると、8時30分からの時間では下層から高度2,000 m程度まで風速シアーが大きいですが、12時30分からの時間では800 m程度から上空の風速が弱くなって、全体として風速シアーが小さくなっている様子が良く分かる。16時30分からの時間では、2,000 m程度以下の高度で、風速シアーは小さい状態が継続しているが、全体的に12時30分からの時間に比べて風速が増加している。

Fig. 9に示されたような大気境界層における風速の時間変化は、同じ名古屋地方気象台のウィンドプロファイラによる中立に近い時の状況（堀口, 2018）や2019年と2020年の秋季における状況（堀口, 2021）と同様であり、Crawford and Hudson (1973) によるテレビ塔（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時間変化とも良く似ている。

ここまで記したように、大気境界層では午後に風速が増加しているが、地上（高さ17.9 m）での風速値の変化は小さい。すなわち、12時30分からの10分間平均で 6.5 m s^{-1} であったが、17時30分からの10分間平均でも 6.7 m s^{-1} と、風速の増加はわずかな値であった。

4. おわりに

超音波風速計による観測では細かな風速変動と輸送量の時間変化を調べることができ、ウィンドプロファイラによる観測では、大気境界層全体にわたる風速の時間変化を調べることができる。ウィンドプロファイラによって観測された風速の時間変化は、宇治川オープンラボラトリーで観測されたような大きなスケールの乱流構造に伴う運動量と熱の輸送によるところが大きいことが考えられる。

近畿から東海地方にかけて同様な気象状況であった日については、両方の観測から幅広い時間スケールと高度領域で風速変動の様子を調べることができると期待される。今後、他の日の観測例についても解析を行っていく予定である。また、将来的には同じ場所で、接地境界層での乱流観測と上空の風観測が行えると良い。

謝 辞

宇治川オープンラボラトリーにおける観測について、京都大学防災研究所附属流域災害研究センター、気象・水象災害研究部門、技術室の方々のご協力を得た。また、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・配布されたものを使用した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 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.
- 堀口光章 (2021) : 平野上の大気境界層における風速変動, 京都大学防災研究所年報, 第64号B, pp. 137-144.
- 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.
- Grimmond, C.S.B. and Oke, T.R. (1999): Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form, *Jour. of Appl. Meteor.*, Vol. 38, pp. 1262-1292.
- Horiguchi, M., Tatsumi, K., Poulidis, A.-P., Yoshida, T. and Takemi, T. (2022): Large-scale turbulence structures in the atmospheric boundary layer observed above the suburbs of Kyoto City, Japan, *Boundary-Layer Meteor.*, Vol. 184, pp. 333–354.
- Stull, R.B. (1988): *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, 670 p.

(論文受理日 : 2022年8月31日)