

京都市近郊における大気境界層乱流

—2019年秋季における観測事例—

Turbulence in the Atmospheric Boundary Layer in the Suburbs of Kyoto City: Observational Cases in the Autumn Season of 2019

堀口光章・竹見哲也

Mitsuaki Horiguchi and Tetsuya Takemi

Synopsis

Intensive observations of wind and turbulence in the atmospheric boundary layer (ABL) were conducted in the suburbs of Kyoto City during the autumn season of 2019. During the daytime in the afternoon, strong winds in the lower ABL were observed by a Doppler lidar and a sonic anemometer. Intermittent occurrence of the further intensification of wind speed was also observed. During the period of strong winds, large-scale areas of upward velocity or high speed with temporal scales of approximately 80 s or more were detected by the Doppler lidar and sonic anemometer observation. The wind pattern of a high-speed area and a low-speed area resembles that of the coherent structure, which consists of a weak ejection (region of upward motion) and a strong sweep (region of downward motion).

キーワード: 大気境界層, ドップラーライダー, 乱流構造, 強風域

Keywords: atmospheric boundary layer, Doppler lidar, turbulence structure, strong wind area

1. はじめに

2019年8月末から10月の始めにかけ、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）において大気境界層の風と乱流についての集中的な観測を行った。この観測は、科学研究費基盤研究(B)「気候変動に伴う都市における暴風災害リスクの評価」の一環として、実際の都市における風と乱流の状況を把握するために行ったものである。

観測を行った宇治川オープンラボラトリーは、京都市の市街地南端に位置しており、北寄りの風の場合、都市上空を通過してきた風の様相とその乱流特性を調べることができる。ことに、運動量輸送や乱れに大きな影響を与えられと考えられる大規模な乱流構造の出現状況を把握することを目的としている。

観測を行った時期は、夏の終わりから秋にかけて

まだ暑さの残るころであり、日中に地表が暖められ、大気下層の成層状態が不安定になるものと考えられる。

2. 観測の概要

今回の観測前の2019年2月、宇治川オープンラボラトリー観測塔頂部高さ55 mに超音波風速計（Campbell Scientific製CSAT3）が新しく設置され、従来の観測塔高さ25 mの超音波風速計（カイジョー製DA-600）と合わせて観測データが0.1秒ごとにデータロガー（Campbell Scientific製CR1000）によりサンプリングされている。高さ55 mの超音波風速計は、観測塔頂部デッキの西端から北西方向に取り付け金具を伸ばしてその先にセンサー（測定部）を設置しており、センサーは北西方向を向いている。センサ

一の支柱などによる風への影響があるため、センサーの先端方向からの風向の場合に良好に測定できる。また、高さ25 mの超音波風速計は、北向きにプローブの正面（鉛直成分測定用プローブヘッドが取り付けられている方向）が向くように取り付けられている。プローブの支柱などの影響のため、プローブ正面に向かう風向の場合に良好に測定できる。従って、北寄りからやや西寄りの風向の場合には、両方の超音波風速計での測定に対して観測塔や取り付け部などの影響が少ないものと考えられる。

観測時の大気不安定度について、接地層での安定度の指標 z/L （ z は測定高度、 L はObukhovの長さ）を高さ25 mの超音波風速計による測定から評価する。この z/L は次式(1)により定義される。

$$z/L = - \frac{(g/\bar{T})(\overline{wT'})}{u_*^3/kz} \quad (1)$$

ただし、 $'$ は平均値からの変動成分、 $\bar{}$ は時間平均、 g は重力加速度、 T は気温、 w は鉛直方向風速成分（上向きを正にとる）、 u_* は摩擦速度、 k はvon Karman定数（ $= 0.4$ ）である。摩擦速度（ u_* ）は以下（式(2)）のように定義され、下向きの運動量輸送に対応する値から得られる代表的速度スケールである。

$$u_* = [-\overline{(u'w')}]^{1/2} \quad (2)$$

ここで u は平均流方向風速成分である。実際の風の三次元的な平均流方向は水平面から上下に勾配を持っていることがある。そのため、上式(1)、(2)において座標軸の取り方に敏感であると考えられる共分散 $\overline{w'T'}$ 、 $\overline{u'w'}$ を求める際には u を三次元的な平均流方向に取り、 w はそれに上向きで直交する方向に取っている。

z/L の値は、乱流による熱輸送が下向きになる時には正の値、熱輸送が上向きになる時には負の値を示し、熱輸送が小さく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その絶対値がゼロに近くなるという傾向がある。この z/L の値がゼロに近い時を大気の成層状態との関連から「中立に近い」という言葉で表す。

また、大気境界層下層の風の観測として、ドップラーライダー（Leosphere製WINDCUBE WLS7）により上空40 mから220 mまで20 mおきの高度における風速3成分（水平2成分、鉛直成分）を4秒おきに測定した。2016年（堀口ほか、2017）に使用したドップラーライダーでの北、東、南、西方向へと天頂方向から斜めに傾いたビームによる測定に加え、今回使用したドップラーライダーでは鉛直方向のビームによる測定を行っている。また、斜めのビームの天頂角は28度である。上記の各方向へ順番に0.8秒ごとにビームを向けて大気中のエアロゾル粒子により後方散乱されるレーザー光のドップラーシフトを測定する。そして各方向の同じ高度で風速、風向が一様であることを仮定して風の水平成分を求め、一方、鉛直成分の風は鉛直方向のビームにより求めている。測定高さの違いはあるが、高さ55 mの超音波風速計による測定データと比較すると、水平風速、鉛直風速とも、良い対応が得られている。

3. 観測結果

観測期間の中から、観測事例として、ほぼ一日中北寄りの風が吹き都市上空を通過してきた風についてのデータ解析を行うことができる9月16日についての結果を調べる。この日、京都地方気象台での観測によれば、9時、15時とも天候は晴であった。なお、解析期間中には北寄りの風が吹いた別の日もあるので、今後その日についても解析して比較検討することが必要である。

まず、高さ25 mの超音波風速計による観測データから30分ごとの平均風向、 z/L 、摩擦速度（ u_* ）、平均流方向風速成分（ u ）（平均値）をFig. 1に示す。朝の7時ごろまで風は弱く、風向も乱流観測には条件が良くない東寄りの時がある。その後、8時ごろより風向が北寄りとなり、少し不安定側の z/L の値ではあるが中立に近い安定度で、その日中午後にかけて次第に風速が強くなっている。最も風速（風速成分 u ）が強くなるのは14時30分から15時の時間帯で、 8.1 m s^{-1} に達している。その時間帯での z/L の値は -0.1 であり、中立に近い安定度であった。その後、夕方から夜にかけては風が弱くなっている。摩擦速度の値は、風速と同様に日中後に大きくなる変化を示し、14時から14時30分の時間帯に最も大きくなっている。

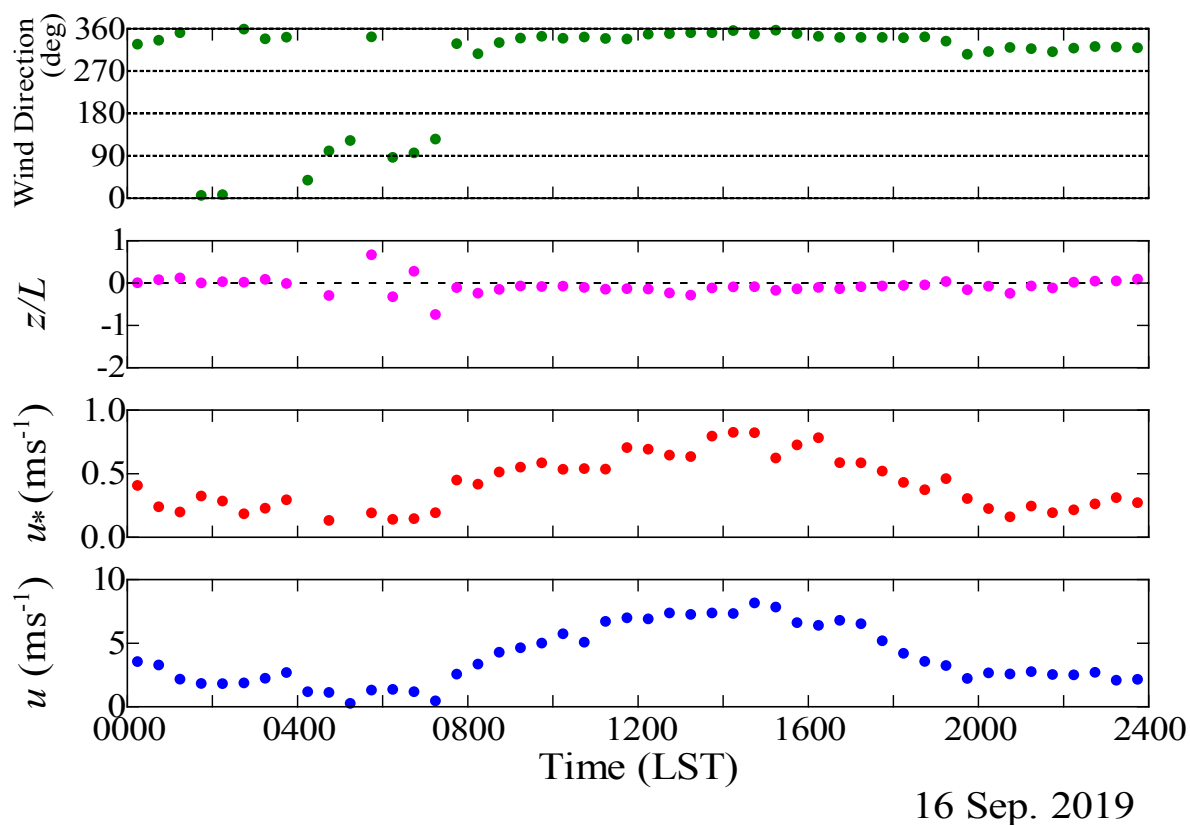


Fig. 1 Wind direction, surface-layer scaling parameter (z/L), friction velocity (u_*), and the streamwise velocity component (u) at 25 m for each 30-min data segments on 16 September 2019.

ドップラーライダーによる10分間平均水平風速の時間変化を見ると、朝まで風速が弱かったのが日中の午前中より時々風速が強くなる時間帯が現れている (Fig. 2) . その後、11時半ごろより日中の午後、夕方まで高度40 mから220 mまでの観測全層にわたり風速が強くなっている。その風速が強い時

間帯において、さらなる風速の強化が断続的に見られており、全層中で最も風が強いのは14時30～40分における高度200 mの風速 12.6 m s^{-1} である。この時には観測下限高度の40 mでも 10.3 m s^{-1} の風が吹いており、超音波風速計（高さ25 m）での風速成分 u （30分ごとの平均値）が最も強い時間帯と対応している。

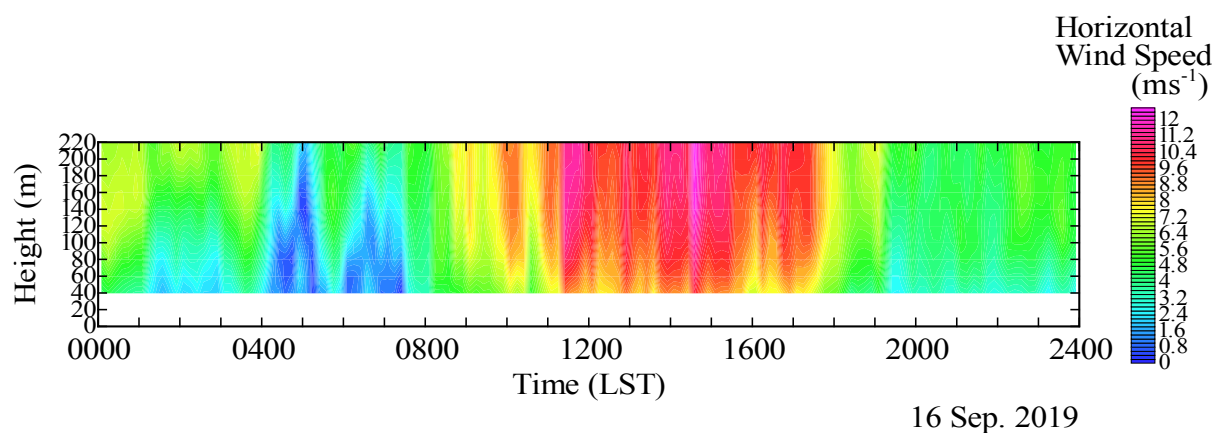


Fig. 2 Horizontal wind speed in 10-min average observed by the Doppler lidar on 16 September 2019.

ここで、ドップラーライダーによる上空の風向について、一日の変化を見てみることにする。Fig. 3に各測定高度での10分ごとの平均風向を示す。下層で主に東寄りの風向が現れる朝方の時間帯以外では北寄りの風が吹いていることが分かる。地形など局地的な影響を受けない一般風としては、一日中、北寄りの風であったと考えられる。また、朝方の時間帯には風速も弱く、局地的な風が京都盆地に吹いていたことが推測される。

日中午後の風速の強化については、今回の観測期間中の別の日にも観測されている。また、2016年と同じ宇治川オープンラボラトリーで行われた観測でも確かめられている（堀口ほか，2017）。この場所での大気境界層下層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（最も上の測定点の高度は445 m）下部での観測結果と似ている。Crawford and Hudsonは、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が、今回の観測でも、日中に盛んになった乱流による混合により、上空の強く吹いている風の運動量が下方へ輸送され、大気境界層下層で風速が強くなったものと考えられる。

Crawford and Hudson (1973) による観測結果では、90 mの測定点より上の高度で日の出後、午前中の時間において風速が減少している。そして午後の時間で風速が増加する。一方、今回の場所での観測結果では、午前中から風速が増加し、午後にかけてさらに風速が増加している。このような風速日変化の違いは、観測場所の周囲の地形、環境、また一般風の

吹き方の違いによるものと考えられる。

この日の午後、大気境界層下層の風速が強くなった後の時間より、ドップラーライダーによる4秒おきの（平均しない）オリジナル観測データから、やや不安定寄りの安定度（ $z/L = -0.3$ ）であった13時から13時30分の時間帯と、風が強く中立に近かった（ $z/L = -0.1$ ）14時30分から15時の時間帯での乱流変動を調べ、それらを比較検討する。13時から13時30分での時間帯での超音波風速計による平均流方向風速成分（ u ）の平均値は 7.2 m s^{-1} 、14時30分から15時の時間帯での平均値は上記のように一日のうちの最大で 8.1 m s^{-1} である。

Fig. 4では、13時から13時30分の時間帯における観測から、上側にドップラーライダーと超音波風速計（高さ25 m）による鉛直方向風速成分（ w ）、下側に両測器による平均流方向風速成分（ u ）の値を示す。なお、ドップラーライダーについては、測定高度40 mの（水平面内）平均流方向に各高度での風速成分 u を取っている。Fig. 3に示すように、この時間帯ではどの測定高度でも北寄りの風向であるので風速成分 u の取り方による影響は少ないが、ある一つの地点の上空での連続観測から鉛直断面の空間構造として風速分布をとらえるための解析方法である。また、Fig. 4での時間高度断面図はドップラーライダーによる観測結果、時間変化のグラフは超音波風速計による測定結果である。風速成分 w については上向きの風速を正の値に取っている。前述のように、この時間帯では z/L 値で -0.3 と、やや不安定寄りの安定度であった。

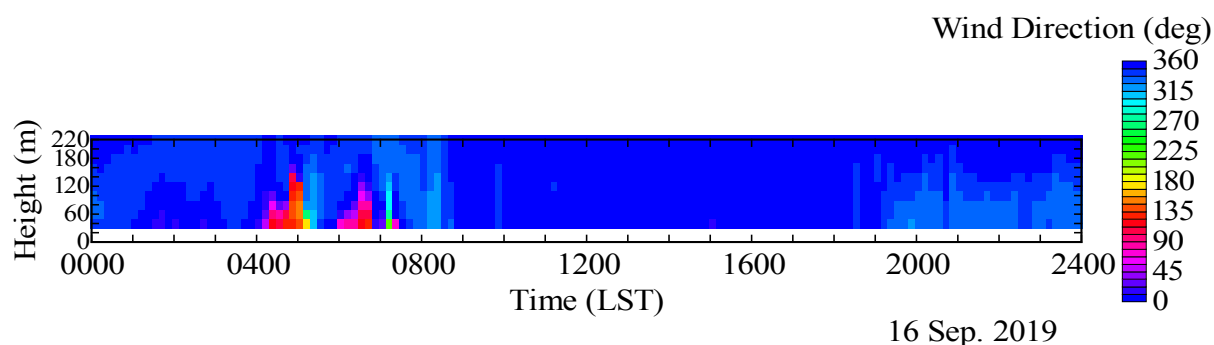


Fig. 3 Wind direction in 10-min average observed by the Doppler lidar on 16 September 2019.

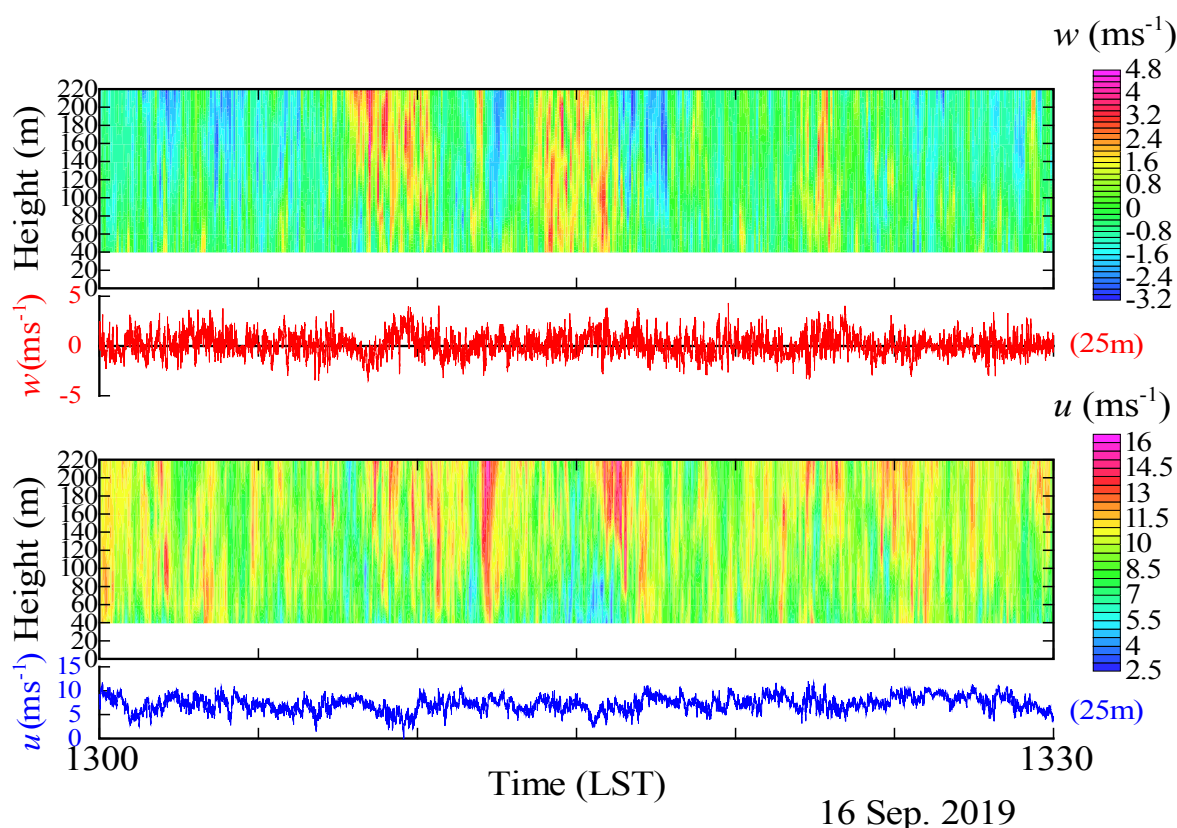


Fig. 4 Vertical velocity component (w) and streamwise velocity component (u) observed by the Doppler lidar (time–height cross sections) and the sonic anemometer at 25 m (graphs), obtained during 1300–1330 LST on 16 September 2019.

この時間帯での観測より、時間スケールで100秒程度の大規模な上昇流域が超音波風速計による観測で見られ（時刻13時10分頃）、また上空のドップラーライダーによる観測でも大規模な上昇流域（時間スケール100数十秒程度）が超音波風速計による観測での上記の時間より少し前の時間を中心として観測される。上空の上昇流域の方が少し前の時間に出現していることになる。この上昇流域中の超音波風速計による最大の上昇流（0.1秒ごとのサンプリングにおける瞬時値）は 4.0 m s^{-1} 、ドップラーライダーによる最大の上昇流は高度160 mで 4.6 m s^{-1} に達している。その後13時15分ごろにもドップラーライダーで大規模な上昇流域が観測されているが、これら上昇流域内に短い時間スケールの上昇流が見られる。

この時間帯での平均流方向風速成分について、超

音波風速計での瞬時値の最大は13時22分ごろに 12 m s^{-1} に達しているが、大規模な強風域は明確でない。ドップラーライダーについては13時12分ごろに強風域が観測されているが時間スケールは短い。この時の最大の風速成分 u は高度220 mでの 16.2 m s^{-1} である。その後、大きな時間スケールの強風域がドップラーライダーにより13時16分ごろに観測されている。この強風域の時間スケールは高度160 mで考えると80秒程度である。また、この強風域は、前述の13時15分ごろの大規模な上昇流域と関係していることが考えられる。この強風域については、観測高度の上下の位置、また地表近く（超音波風速計による測定高度）での強風域中心の時間を見ると、上空から先に観測されている。空間構造として考えると、上部が風下方向に傾いた構造を持っていることになる。

Fig. 5では、14時30分から15時の時間帯における観測結果を示す。Fig. 4と同じく、ドップラーライダーと超音波風速計（高さ25 m）による観測から、上側に鉛直方向風速成分、下側に平均流方向風速成分の値を示す。また、時間高度断面図はドップラーライダーによる観測結果、時間変化のグラフは超音波風速計による測定結果である。Fig. 4の13時からの時間帯と異なることとして、この時間帯では風が強くなり、 z/L 値として-0.1と、中立に近い安定度になっている。

この時間帯については、14時51分ごろに時間スケール100数十秒程度の大規模な上昇流域がドップラーライダーと超音波風速計で観測されている。上昇流の最大はドップラーライダーでは高度220 mの 4.9 m s^{-1} 、超音波風速計でも 4.0 m s^{-1} の瞬時値が測定されている。13時から時間帯での上昇流域と同様に、この時間帯での上昇流域内においても短い時間スケールの上昇流が見られる。いくつかの小さなスケールの上昇流がまとまって大きな上昇流域を形成して

いると捉えることもできる。この14時30分から15時の時間帯では、そのほかには大規模な上昇領域は見られない。

一方、平均流方向風速成分については変動が大きく、大規模な強風域も頻繁に観測されている。例えば14時31分ごろに超音波風速計による測定で、風速成分 u が 4 m s^{-1} 程度から 13 m s^{-1} を越える大きさへと急激に増加している。ドップラーライダーによる観測でも、観測全高度で急激に風速が増加している。強風域の規模として超音波風速計による風速成分 u が 7 m s^{-1} を越える時間を考えると80秒程度である。この強風域以外にも14時55分ごろにはっきりした強風域がドップラーライダーと超音波風速計で見られる。また、これらの14時31分ごろ、14時55分ごろの強風域に関係すると思われるあまり大きくない上昇流域がドップラーライダーによりそれらの強風域の出現直前に観測されている。強風域と上昇流域の関係性については、後に別の時間帯の例により詳細に調べることにする。

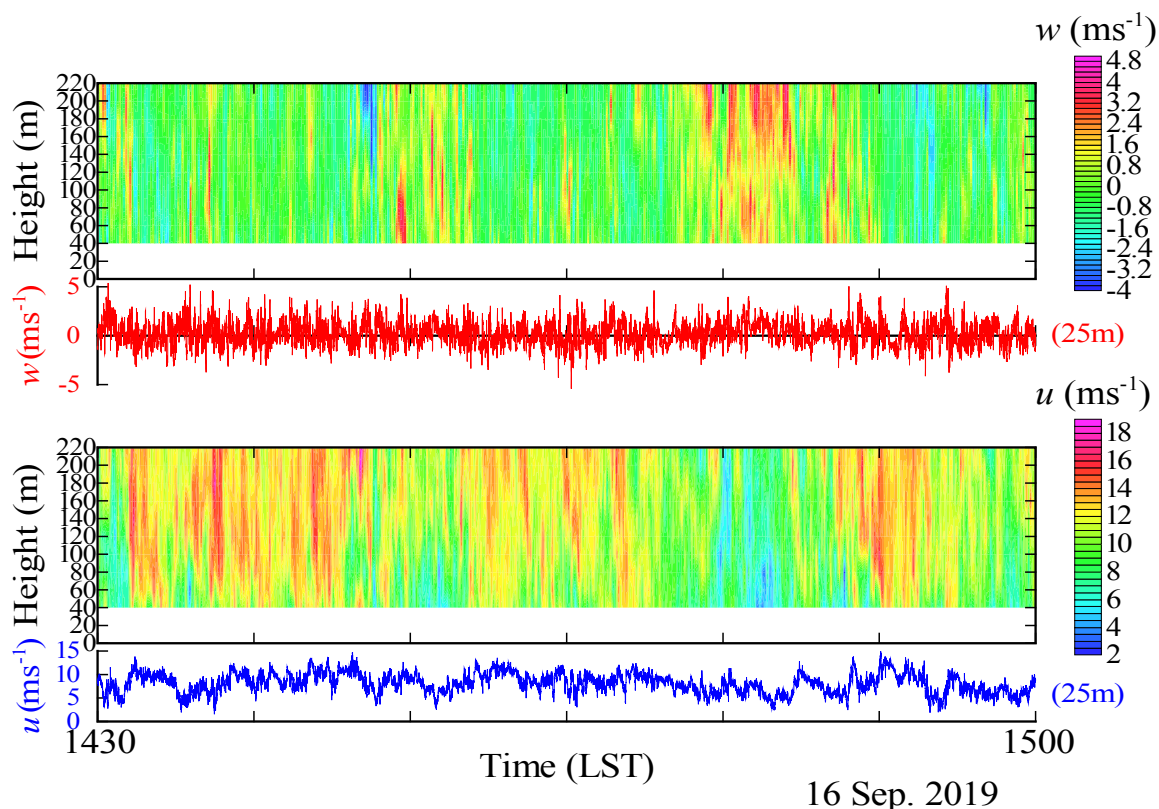


Fig. 5 Vertical velocity component (w) and streamwise velocity component (u) observed by the Doppler lidar (time–height cross sections) and the sonic anemometer at 25 m (graphs), obtained during 1430–1500 LST on 16 September 2019.

13時から13時30分の時間帯と14時30分から15時の時間帯を比較すると、超音波風速計での観測から、平均流方向風速成分の変動が後の時間帯の方が大きいことが見られる。実際に、風速成分 u の乱れの強さ（風速成分 u の標準偏差をその平均値で割った値）を比較すると、13時からの時間帯では0.22であったのが14時30分からの時間帯では0.26と大きくなっている。この乱れの強さの変化は、強風域の出現状況の変化によることが考えられる。14時30分からの時間帯では、超音波風速計によって観測される強風域に対応して、ドップラーライダーによっても大規模な強風域が時々観測されている。また、下方への運動量輸送の大きさに関係している摩擦速度（式(2)）の値を比べると、13時からの時間帯では 0.63 m s^{-1} であ

るのが14時30分からの時間帯では 0.82 m s^{-1} とかなり大きくなっている。上空から下方へ運動量が盛んに輸送され、これに伴って強風の領域が現れていることが分かる。

強風域と上昇流域の関係性について、大規模な強風域の観測例により検討する。Fig. 6は16時から16時30分までの時間帯におけるドップラーライダーと超音波風速計（高さ25 m）による観測結果である。この時間帯での z/L の値は -0.1 で、中立に近い安定度であった。Fig. 6ではこれまでの図（Fig. 4, 5）と同じく、ドップラーライダーと超音波風速計（高さ25 m）による観測から、上側に鉛直方向風速成分、下側に平均流方向風速成分の値を示す。

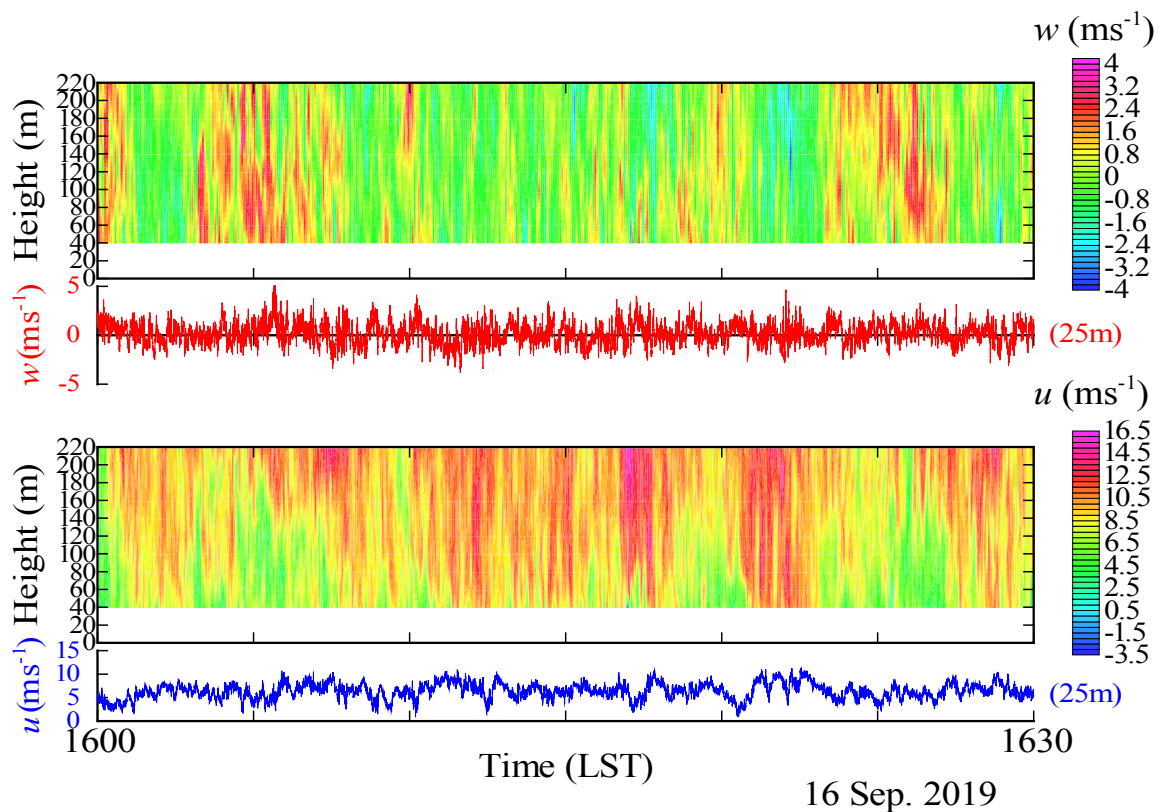


Fig. 6 Vertical velocity component (w) and streamwise velocity component (u) observed by the Doppler lidar (time–height cross sections) and the sonic anemometer at 25 m (graphs), obtained during 1600–1630 LST on 16 September 2019.

この時間帯における16時21分ごろの時間からドップラーライダーの平均流方向風速成分にはっきりとした大規模な強風域が現れ、また、その前の時間を見るとドップラーライダーの鉛直方向風速成分に上昇流域が観測されている。これに伴って、超音波風速計でも強風域、上昇流域が見られる。この時の平均流方向風速成分と鉛直方向風速成分をFig. 6のように別々の図で示すと強風域、上昇流域の位置関係が分かりにくいので、一枚の図にまとめることにする。

強風のイベントの中心を超音波風速計による風速成分 u が極大となる時間（16時21分17秒）とし、Fig. 7の上側にドップラーライダーによる観測データ、下側に超音波風速計によるものを示す。そしてドップラーライダーについては平均流方向風速成分を色分けにより、鉛直方向風速成分の方向と大きさを矢印の向きと長さにより示す。一方、超音波風速計については、平均流方向風速成分を折れ線グラフで、鉛直方向風速成分を（ドップラーライダーと同様に）矢印で示している。また、図の横軸は右から左に時間が進むように書き直している。これは、ある一地点での時間変化する観測データから、空間的に広が

りをもった構造が平均的な風に乗って動いているように現象を考える際に、図の縦軸のある左側から右側へ向かって構造が動く、すなわち空間構造の前方が右側であるように横軸（時間軸）の方向を取る方が把握しやすいということによる。

Fig. 7を見ると、超音波風速計による平均流方向風速成分の時間変化から時間スケールで100秒あまりの長さの強風域が見られ、それに対応してドップラーライダーでも上空に強風域が観測されている。また、これら強風域の中に、詳しく見るといくつかのより小さな強風の構造があることが分かる。強風域における鉛直風の向きは超音波風速計ではその傾向が明確でないが、ドップラーライダーでは強風域内で下向きの鉛直風が観測されており、下降する強風域の構造になっていることが分かる。下降流の最大値は高度140 mでの 3.8 m s^{-1} であり、かなり大きな下降流となっている。また、ドップラーライダーによる観測で、強風域の前方（前の時間）には上昇する弱風域が広がっていることが分かる。上昇流の最大値は、高度180 mでの 2.7 m s^{-1} である。この弱風域での上昇流は超音波風速計（高さ25 m）でも観測されている。

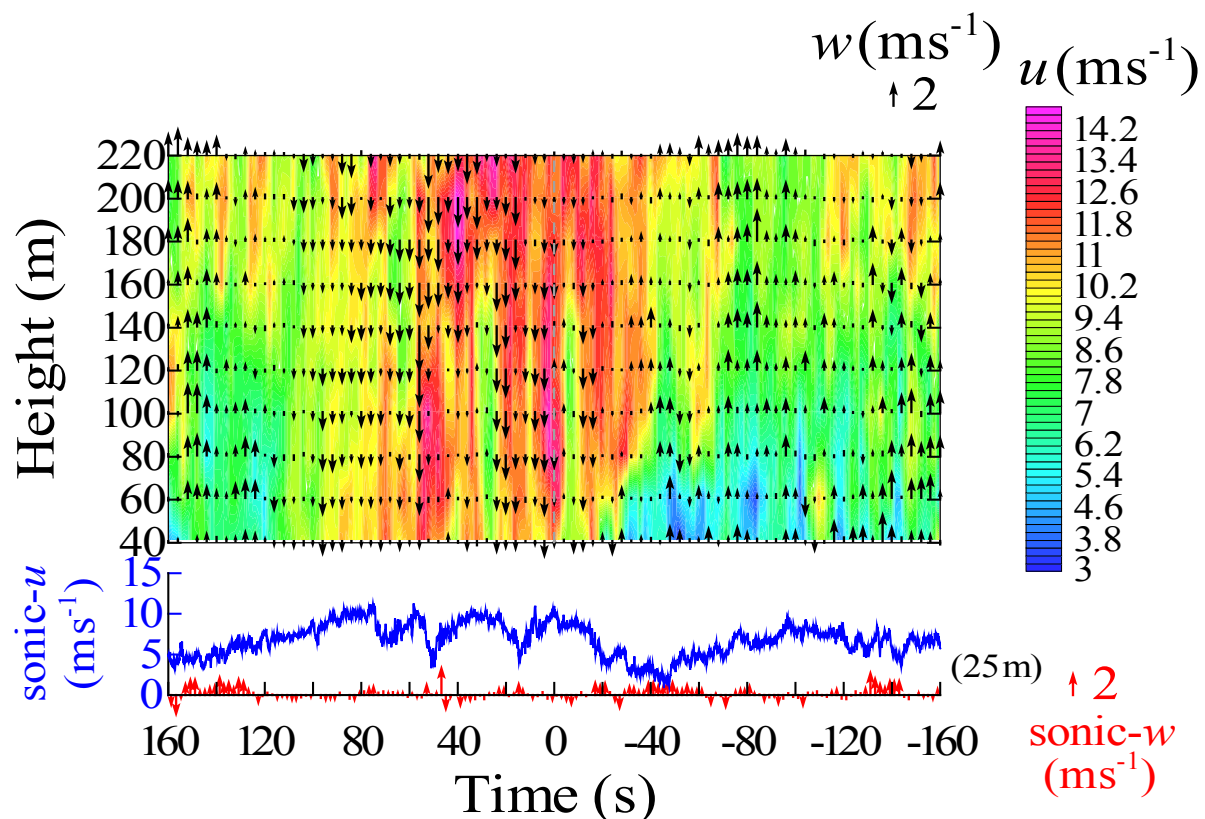


Fig. 7 Typical wind pattern observed by the Doppler lidar (upper panel) and the sonic anemometer at 25 m (lower panel) around 1621 LST on September 16, 2019.

Fig. 7に示されるような強風域と弱風域による三次元的な風速分布の様相は、Gao et al. (1989)によって植生キャノピー上で観測された弱風の「イジェクション」(上昇流域)と強風の「スウィープ」(下降流域)による組織構造(coherent structure)での風速分布と同様なものである。今回の観測ではドップラーライダーにより大きな下降流が観測されており、Hunt and Morrison (2000)が示唆した大きなスケールの乱渦が壁面(地表)に向かって入りこんでくる動きのように、上空の強風域が地表へと侵入してくることによる構造で、下降してくる強風域の前面では上昇流が引き起こされていると考えられる。

今回観測された強風域と弱風域からなる乱流構造は、ドップラーライダーによる観測上限高度220 m以上まで広がっていると考えられ、また時間スケールも100秒以上に及ぶ大規模な構造である。このような構造は、例えばつくば市における気象観測鉄塔での観測例(Horiguchi et al., 2012)でも示されており、中立に近い状況で場所によらず一般的に形成される乱流構造と考えられる。しかし、Fig. 4, 5, 6の30分ごとの図で示されるように大規模な乱流構造はそれほど頻繁には出現していない。乱流構造が平均的な風に乗って動いているように考えると、その構造の中央近くが観測地点上を通過しないと大きなスケールとして観測されないということも関係しているかもしれない。

Fig. 7に示される乱流構造において、上昇する弱風域の部分での超音波風速計による音仮温度の測定値を調べると、イベント中心時間での値に対して上昇流域では最大で1.2℃程度高くなっている。なお、音仮温度は超音波風速計によって測定される音速から求められる温度で、気温とは水蒸気量に依存して少し差があるが、その変動部分についてはおおよそ気温の変動に対応していると考えられる。そして観測結果から、今回の上昇する弱風域は、日中に大気下層が熱せられて生じる高温の上昇流の構造であるブリュームの構造(Stull, 1988)と似ているものと考えられる。16時から30分間における安定度については不安定寄りではあるが中立に近く、そのような時にも不安定時の構造と似た乱流構造となっていることが分かる。

以上の乱流構造についての観測結果は、2016年冬季に宇治川オープンラボラトリーで行われた観測(堀口ほか, 2017)で得られたものと同様であり、季節によらず形成されている構造と考えられる。このような乱流構造の形成については、都市における大きな建物などの粗度物体による影響が考えられる。

4. おわりに

2019年の観測では、北寄りの風が吹いた別の日の観測例も得られている。複数の観測例により、この場所における大気境界層の風と乱流特性について、特に不安定時と中立に近い時で大規模な乱流構造にどのような違いがあるかについて注目し今後検討していく予定である。

謝 辞

本研究はJSPS科研費18H01680の助成のもと実施したものである。また、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。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 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.
- Gao, W., Shaw, R.H. and Paw U, K.T. (1989): Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 47, pp. 349-377.
- Horiguchi, M., Hayashi, T., Adachi, A. and Onogi, S. (2012): Large-scale turbulence structures and their contributions to the momentum flux and turbulence in the near-neutral atmospheric boundary layer observed from a 213-m tall meteorological tower, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 144, pp. 179-198.
- Hunt, J.C.R. and Morrison, J.F. (2000): Eddy structure in turbulent boundary layers. *Eur. Jour. of Mech. B*, Vol. 19, pp. 673-694.
- Stull, R.B. (1988): *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, 670 pp.

(論文受理日: 2020年 8月31日)