

都市近郊における大気境界層の観測 —不安定時の乱流構造—

Observations of the Atmospheric Boundary Layer in the Suburbs of the City —Turbulence Structures under Unstable Conditions—

堀口光章

Mitsuaki HORIGUCHI

Synopsis

Observations of the turbulence in the atmospheric boundary layer have been made in the summer season 2013 using sonic anemometer-thermometers on a meteorological tower (55-m tall) of the Observation and Analysis System for Local Unusual Weather and a Doppler lidar in the Ujigawa Open Laboratory. Here, typical examinations under unstable conditions are presented. An ascending large-scale area with the time scale of more than 100 s was observed. This structure appears to correspond to the plume structure forced by buoyancy in the heated lower layer. After the passage of the ascending area, the area of strong winds was observed in the surface layer. From the analysis of wavelet transform for the vertical velocity, intermittent occurrence of large-scale structures is revealed.

キーワード: 大気境界層, 不安定状態, 乱流構造, プリューム

Keywords: atmospheric boundary layer, unstable condition, turbulence structure, plume

1. はじめに

科学研究費挑戦的萌芽研究「上空の強風層の降下による地上での災害の発生とその予測に関する研究」(平成24~25年度)の一環として, 防災研究所宇治川オープンラボラトリーにおいて, 日中には浮力による乱流の生成が大きく不安定な状態が主となる2013年夏季(6~7月)に大気境界層乱流の観測を行った。今回の観測の主な目的は, 上空の強く吹く風の運動量が地表に向かって輸送される過程に関係して, 地表付近で風が変動する(強い風が吹く)現象を調べることである。観測場所は京都盆地の中央部に位置し, 南西側は大阪方面に開けている。また京都市近郊に位置していて, 北方面は建物や道路などが京都市街中心部へと続き, 乱流の性状への地表面粗度物体の影響が考えられる。

2. 観測の概要

観測については, 京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー(京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)(北緯34.9°, 東経135.7°)において行われた。今回は, この場所に建てられている観測鉄塔の高さ25 mと40 mに設置された超音波風速計(カイジョー製, DA-600)(Photo 1)に加えて, 新たに波長1.54 μm のレーザーを使用したドップラーライダー(Leosphere社製WINDCUBE WLS7)を設置し(Photo 2), 上空40 mから200 mまで20 mおきの高さにおける風速3成分を約4秒おきに測定した。この型のドップラーライダーは, レーザパルスを天頂から傾けられた上空4方向に発射し, 空気中の粒子(エアロゾルなど)によって後方散乱された光のドップラー変位から, 各高度における風の一様性を仮定して風速3成分を求めている。

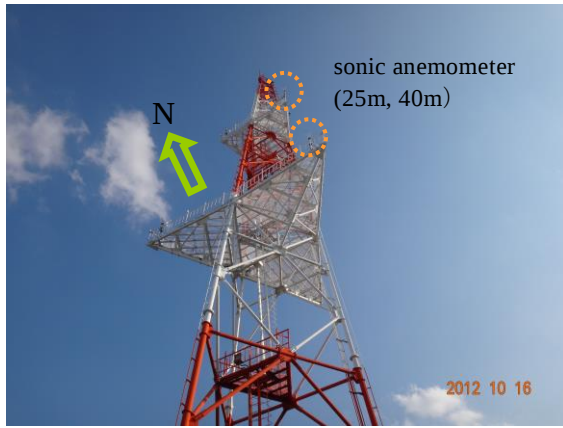


Photo 1 Sonic anemometers on the tower. “N” denotes the direction to the north.



Photo 2 Doppler lidar (WINDCUBE)

ドップラーライダーについて、風速の測定空間（サンプルボリューム）は各設定高度のプラスマイナス13mの高度幅を持ち、レーザーパルス発射角度は天頂より約15度傾けられ、約1秒ごとに北、東、南、西方向のサンプリングを行って、これが繰り返される。風速データについても、約1秒ごとに風速3成分が出力されるが、4方向のサンプリングで一組のデータが計算されるので、風速データの実質的な時間間隔は約4秒である。なお、今回は、視線方向（レーザーパルス発射方向）の風速成分データから風速3成分を計算する（4方向から一組のデータ）処理を観測後に行った。元々の観測データではS/N比（信号のノイズに対する比率）が良くない時に風速3成分が出力されない処置がなされているが、視線方向の風速成分データは記録されており、そのデータから風速3成分を求めることが出来る。ただし、その風速値の精度について十分に注意を払う必要がある。

また、測定時間間隔が普通より長い時が時々データに混じっており、等時間間隔データについての解析を行うあとで述べるウェイブレット解析の際に必

要となるため、あらかじめ0.1秒間隔で内挿したデータを作成している。

このドップラーライダーによる風の観測の精度については、これまでに多くの評価がなされており（例：Cañadillas et al., 2011）、平均風速・風向については十分に良い結果が得られている。ただし、上空の広い空間での風の一様性を仮定しているため、原理的にそれより小さな空間スケールの風速変動を正確に捉えることはできない。上空ほど各レーザー発射方向における測定空間の位置の違いは大きくなるので、測定できるスケールも高度に伴い変化する。

接地層での安定度については、その指標 z/L （例：Kaimal and Finnigan, 1994）を高さ40 mの超音波風速計による測定から評価する。ここで、 z は測定高度、 L はObukhovの長さである。この z/L の値は、乱流による熱フラックスが下向きになる上空の方が温位が高い安定成層時にはプラスの値、熱フラックスが上向きになる不安定成層時にはマイナスの値、熱フラックスによる寄与が小さい時（中立に近い時）にはゼロに近くなる（Stull, 1988）。なお、この z/L の値を求める際の運動量と熱のフラックスの計算においては、平均流が厳密には水平面より上向き（吹き上げ）あるいは下向き（吹き降ろし）になっていることを考慮して、平均流方向を含む鉛直断面内で平均流ベクトルに直交する方向へのフラックスを計算している。

超音波風速計は、水平風速変動を測定する2組のプロープヘッドと鉛直風速変動を測定する1組のプロープヘッドが支柱から同じ側に取り付けられている主風向限定型のプロープ（TR-61A）を使用しており、これが北方向に向けられている。また、南寄りや東寄りの風の場合には、プロープの支柱以外にも、鉄塔の塔体、デッキからの影響を受ける（Photo 1参照）。そこで今回は、乱流統計量についての平均化時間を30分とし、その間での平均風向が北からプラスマイナス60度以内の場合を解析している。

なお、地表面粗度物体による風速分布への影響を表す指標として地表の粗度長は、0.1～1.7 mという値が2012年12月から2013年3月にかけて行った中立に近い状態での接地層乱流の観測例から平均風速についての対数鉛直分布を仮定することにより求められている（堀口・辰己, 2013）。この粗度長を求めた観測例について、風向は上記と同じ条件を満たしている北寄りの風の場合を選んでいますが、観測例間でばらつきがある。

3. 不安定な状態での観測例

天候が良く、 z/L の値が30分間（1パートとする）の各パートで-1.3～-0.3の不安定な状態が継続した

2013年6月7日13時30分から17時における観測例を示す。この日、午後2時過ぎに北寄りの風が強くなり、鉄塔の高さ55mの風車型風向風速計では、15時10分からの10分間平均で 8.6 m s^{-1} に達している。これは、混合層の発達により、上空の強く吹く風の運動量が乱流により下方へ輸送され、地表近くでも風速が強くなったことによると考えられる。

Fig. 1に14時から30分間のドップラーライダーと超音波風速計（高さ40 m）による（水平面内）平均流方向風速成分 u と鉛直方向風速成分 w の時間変化を示す。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. 1では、地表近くから上空200 mまで上向き鉛直風速を示す長さ100数十秒にわたる大きな構造が見られ、地表付近の大气が暖められることにより生じた上昇流域であるプリュームの構造（例: Kaimal and Businger, 1970）と考えられる。

なお、上昇流の強さは高度200 mで 4.0 m s^{-1} に達している。上空でのこの構造の通過直後、地表付近での風が強くなり、高さ40 mの超音波風速計で風速成分 u は 8 m s^{-1} 程度に達している。

全時間にわたる風速成分 u と w に対してMexican Hat函数を用いた連続ウェーブレット変換を行い、ウェーブレット分散スペクトルから乱流構造の時間スケールを調べる。Fig. 2は高さ40 mの超音波風速計によるデータについてのウェーブレット分散スペクトルであり、風速成分 u に対するピークは104秒の比較的大きな時間スケールに位置している。また、 w に対する大きなスケール側の（極大の）ピークは64秒に位置している。高さ40 mの超音波風速計による風速成分 u の平均は 5.0 m s^{-1} であり、Taylorの凍結渦の仮説により空間スケールに換算するとそれぞれ520 mと320 mの大きさに相当する。

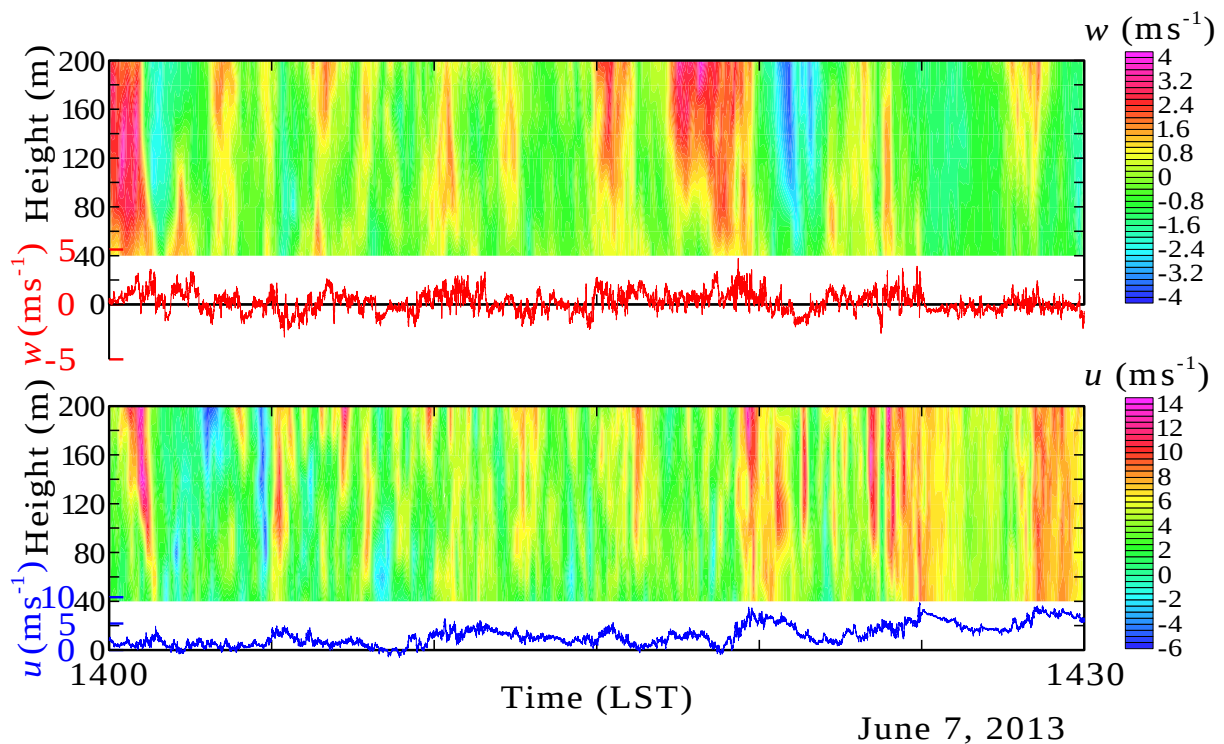


Fig. 1 Streamwise (u) and vertical (w) velocity components observed by the Doppler lidar (time–height cross sections) and sonic anemometer (graphs). The data are obtained during 1400–1430 on June 7, 2013

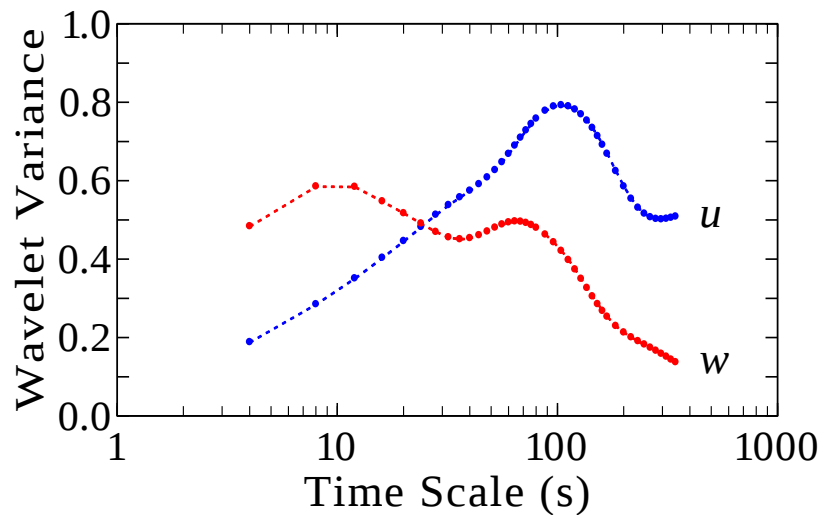


Fig. 2 Wavelet variance spectra for the u and w velocity components measured by the sonic anemometer (40-m height). An unstable case during 1330–1700 on June 7, 2013 is examined

ドップラーライダーによる観測での風速成分 u について、超音波風速計データと同様にウェーブレット解析を行う。Fig. 3にドップラーライダー各高度の風速成分 u に対するウェーブレット分散スペクトルを示す。なお、Fig. 3においては、全ての高度について示すと線が混み合って判読しづらくなるため、一つおきの測定高度に対してのみスペクトルを示している。この解析の結果によれば、低い高度では大きな時間スケール（100秒程度以上の時間スケール）にピーク（最大あるいは極大）が見られ、40 m高度では104秒に位置している。これは、超音波風速計データについての結果（Fig. 2）に対応したものである。一方、上空（80 m以上）については、大きな時間スケールにピークは見られない。

ドップラーライダー観測による風速成分 w につい

ては、ウェーブレット分散スペクトルで大きな時間スケールにピークが見られ、高度40 mでは時間スケール104秒にスペクトル分布での最大のピークが位置している（Fig. 4）。より上空の測定高度でも比較的大きな時間スケールにピークが見られる。高度40 mでピークを示す時間スケールについて、各高度のウェーブレット係数から時間高度断面図を作成すると、大きなスケールの構造が鉛直方向にも大きな広がりを持って出現している様子が明らかになる（Fig. 5）。また、その様相は時間変化しており、次第に風が強くなっている14時30分頃までの時間帯には上昇流、下降流の顕著な構造が交互に出現し、下降流の構造に対応して高さ40 mの超音波風速計での風速成分 u が大きくなっている。大きな乱流構造に伴って上空の運動量が下方へ輸送されていると考えられる。

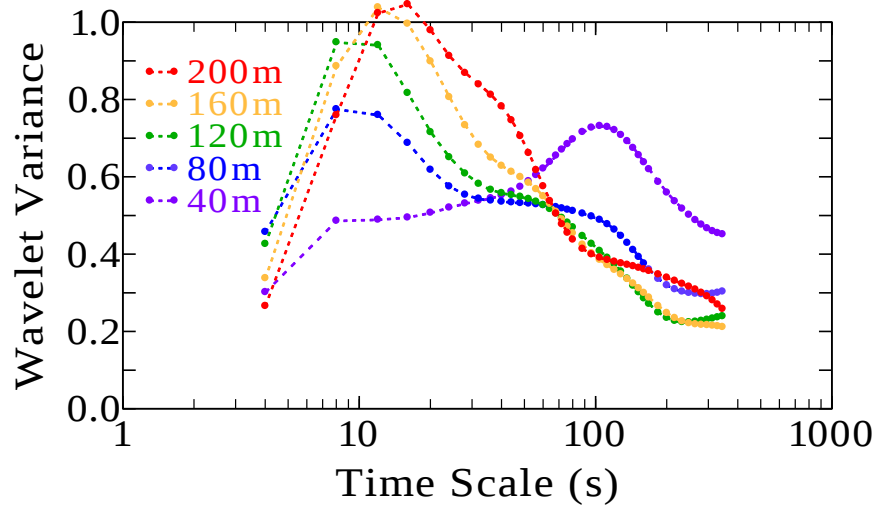


Fig. 3 Wavelet variance spectra for the u velocity component measured by the Doppler lidar as a function of the time scale. An unstable case during 1330–1700 on June 7, 2013 is examined. Graphs are depicted for the spectra every 40-m level

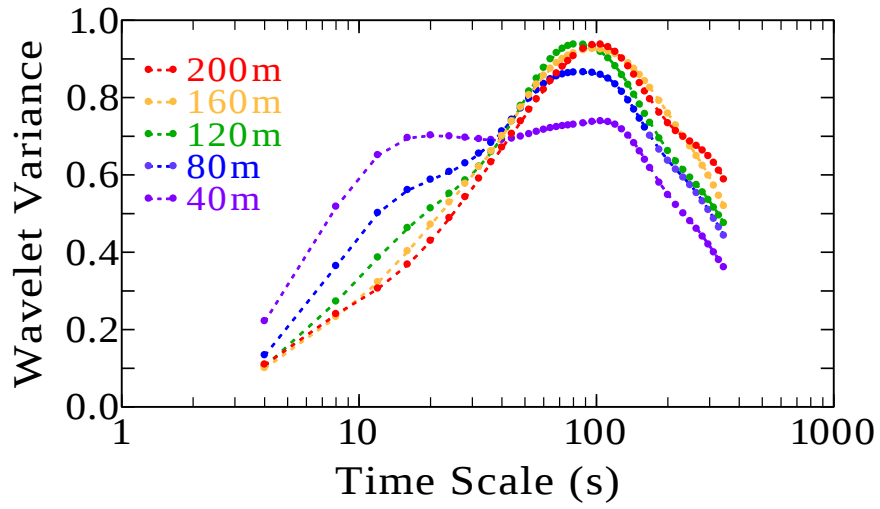


Fig. 4 Wavelet variance spectra for the w velocity component measured by the Doppler lidar as a function of the time scale. An unstable case during 1330–1700 on June 7, 2013 is examined. Graphs are depicted for the spectra every 40-m level

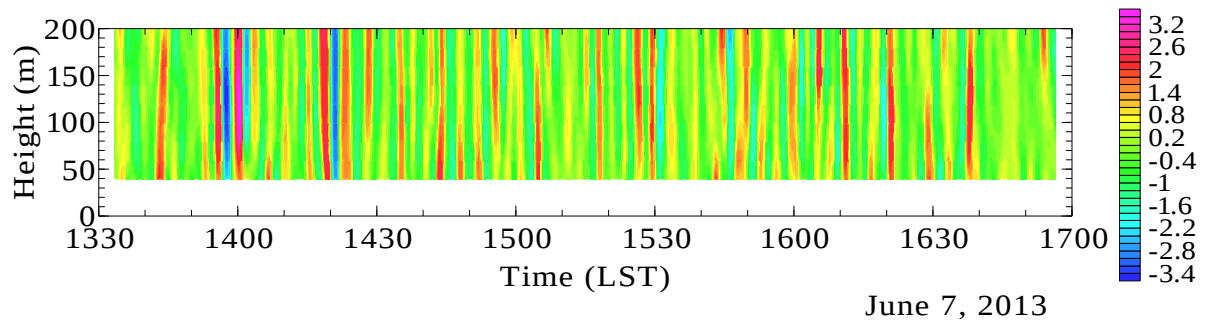


Fig. 5 Time–height cross-section of the wavelet coefficients for the w velocity component observed by the Doppler lidar. Time scale is 104 s. This is examined for the case during 1330–1700 on June 7, 2013

Fig. 5の交互に出現する上昇流と下降流の構造は、プルームの上昇流域とその後方の下降流域が一對となっている構造（例：Horiguchi et al., 2014, Fig. 5）が連続して起こっていることに対応していると考えられる。

4. 不安定時と中立に近い時での比較

次いで、不安定な状態と中立に近い状態とを比較するために、日中に不安定な状態（ $z/L = -1.8 \sim -0.5$ ）であった7月19日11時30分から15時までと、同じ日に夜になって中立に近い状態（ $z/L = -0.1 \sim 0.0$ ）となった19時30分から23時までの時間帯の例を比較する。この日の天候は、京都地方気象台の記録（気象庁ホームページ参照）によれば、15時に薄曇、21時には晴れという天気であった。宇治川での観測鉄塔の高さ40 mの超音波風速計による平均風速は、不安定な時間帯で各パートについて 3.8 m s^{-1} から 4.2 m s^{-1} の範囲、中立に近い時間帯では 5.0 m s^{-1} から 2.8 m s^{-1} へ

変化していた。なお、この日は北寄りの風が続き、高さ55 mの風車型風向風速計による10分間ごとの風向（毎秒の16方位の風向データから10分間での最多風向）は、西北西から北の範囲であった。

Fig. 6は不安定な状態にあった時間帯（11時30分～15時）について、高さ40mの超音波風速計による風速成分 u 、 w に対するウェーブレット分散スペクトルである。風速成分 u に対するピークは200秒の時間スケール、 w に対する大きなスケール側の（極大の）ピークは160秒に位置している。中立に近い状態にあった時間帯（19時30分～23時）にも風速成分 u に対する（極大の）ピークが96秒の比較的大きな時間スケールに見られるが（Fig. 7）、不安定な状態の場合のピークの方が顕著である（Fig. 6）。また、中立に近い状態では風速成分 w に対して大きなスケールにピークは見られず、夜になってプルームの大きな規模の構造がもはや出現しなくなったことに対応している。

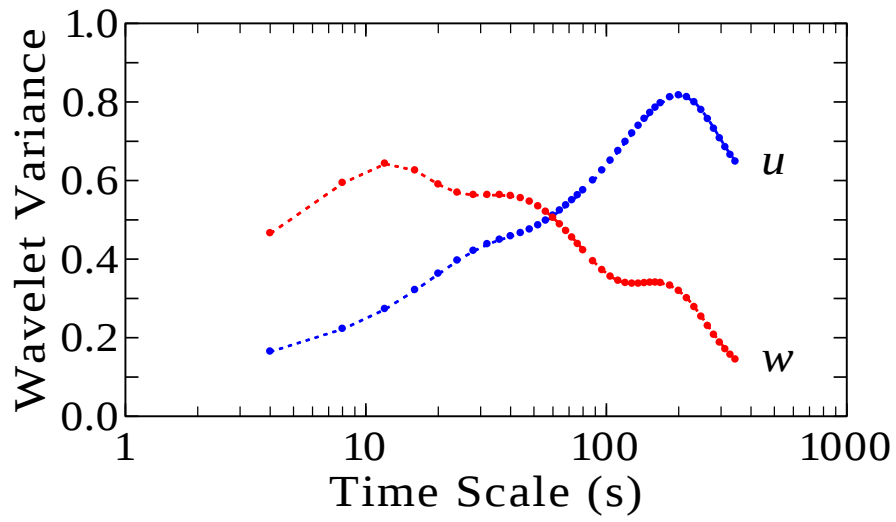


Fig. 6 Wavelet variance spectra for the u and w velocity components measured by the sonic anemometer (40-m height). An unstable case during 1130–1500 on July 19, 2013 is examined

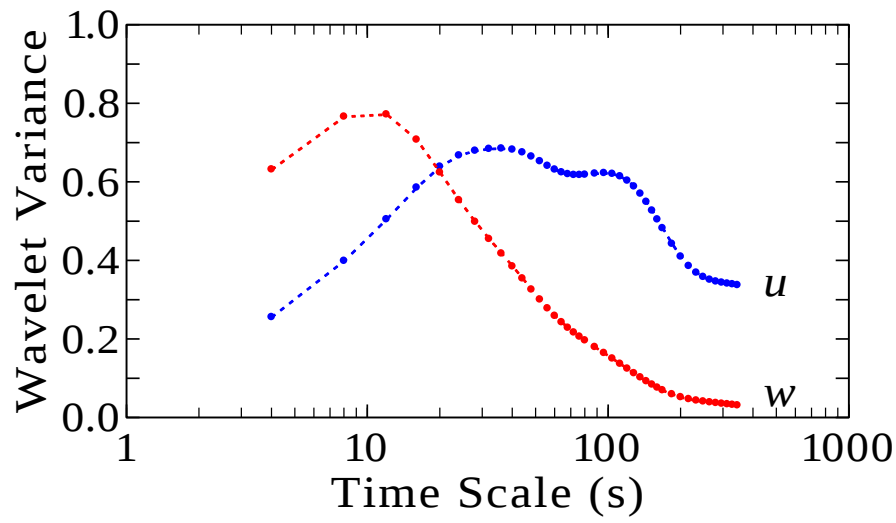


Fig. 7 Wavelet variance spectra for the u and w velocity components measured by the sonic anemometer (40-m height). A near-neutral case during 1930–2300 on July 19, 2013 is examined

不安定な例についてはドップラーライダー観測による風速成分 w についてのウェーブレット分散スペクトルでも高度140 mより上の高度で大きな時間スケールにピーク（極大）が見られる（Fig. 8）．このピークは高度140 mでは時間スケール224秒に位置している．この時間スケールの各高度のウェーブレット係数から時間高度断面図を作成すると、6月7日の例と同じように大きな時間スケールを持った上昇流の構造が繰り返し出現している（Fig. 9）．なお、この日の観測データについては、160 m以上の高度で

S/N比が良くなく、観測データでは風速3成分が時々欠測になっている（上空ほど、欠測が多い）．しかし、記録されている視線方向風速成分データから風速3成分を計算する処理を行ってそれを解析した結果（Fig. 9）を見ると、比較的良く上空まで風速構造を捉えることができていると思われる．

Fig. 9の図から、例えばウェーブレット係数に対するしきい値を0.8として、高度140 mでその値以上を示す上昇流の構造を数えると、平均して約13分に1回出現していることが分かる．

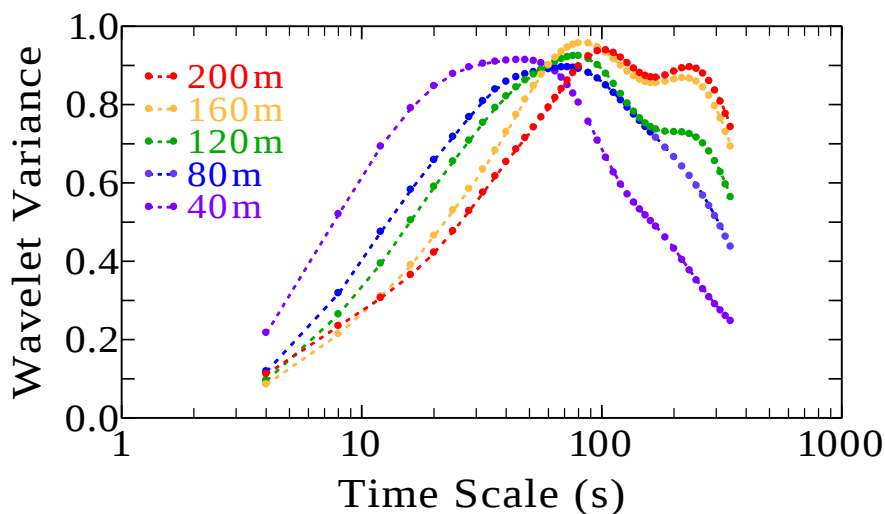


Fig. 8 Wavelet variance spectra for the w velocity component measured by the Doppler lidar as a function of the time scale. An unstable case during 1130–1500 on July 19, 2013 is examined. Graphs are depicted for the spectra every 40-m level

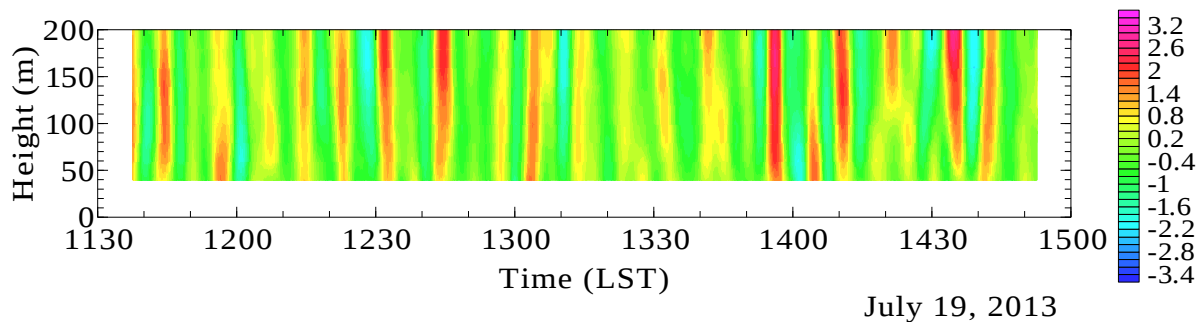


Fig. 9 Time–height cross-section of the wavelet coefficients for the w velocity component observed by the Doppler lidar. Time scale is 224 s. This is examined for the case during 1130–1500 on July 19, 2013

5. おわりに

不安定時に大きな規模の乱流構造が出現し、地表近くの風の変化（比較的強い風の発生）と関係していることが調べられた。今後、地表近くでの強風の発生への乱流構造の影響に注目し、中立に近い場合とも比較して解析を進める予定である。観測については、今回と同様に、上空の風を観測できるリモートセンシングの機器を使用した研究を今後も進める予定である。

謝 辞

本研究はJSPS科研費24651208の助成を受けたものである。また、宇治川オープンラボラトリーでの観測については、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、ご支援によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 堀口光章・辰己賢一（2013）：都市近郊における大気境界層の観測—接地層における乱流の性状—，京都大学防災研究所年報，第 56 号 B，pp. 291-298.
- Cañadillas, B., Westerhellweg, A. and Neumann, T. (2011): Testing the performance of a ground-based wind lidar system, DEWI Magazin, No. 38, pp. 58-64.
- Kaimal, J.C. and Businger, J.A. (1970): Case studies of a convective plume and a dust devil, Jour. Appl. Meteorol., Vol. 9, pp. 612-620.
- Kaimal, J.C. and Finnigan, J.J. (1994): Atmospheric Boundary Layer Flows, Oxford University Press, 289 pp.
- Horiguchi, M., Hayashi, T., Adachi, A. and Onogi, S. (2014): Stability dependence and diurnal change of large-scale turbulence structures in the near-neutral atmospheric boundary layer observed from a meteorological tower, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 151, pp. 221-237.
- Stull, R.B. (1988): An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, 670 pp.

（論文受理日：2014年6月11日）