

信楽における大気境界層乱流の構造の観測

堀口光章・林 泰一・植田洋匡

要 旨

安定度が中立に近い大気境界層における乱流の構造について、その境界層全層にわたる空間構造を信楽 MU 観測所において観測した。大気境界層下層においては、風上方向に傾いた強風域の構造が地表へ向かって下降してきている。また、比較的大きな時間スケールの乱流構造は、鉛直方向にかなりの拡がりを持っている。

キーワード：大気境界層，乱流，組織構造，運動量フラックス，下部対流圏レーダー

1. はじめに

境界層乱流中に秩序だった運動による構造、いわゆる組織構造 (coherent structure) が存在し、乱流輸送と乱れの生成に大きな寄与をなしていることが室内実験や数値実験により明らかにされている (Kline et al., 1967; Corino and Brodkey, 1969 など)。しかし、これらの実験では、慣性力と粘性力の大きさの比を表す無次元数であるレイノルズ数 Re が比較的小さい条件におけるものが多いのに対して、現実の大気境界層では非常に大きなレイノルズ数となっている。

一方、比較的大きなレイノルズ数に対応した条件も扱うことができる数値実験手法であるラージエディシミュレーション (Large Eddy Simulation, LES) を用いた境界層乱流についての研究もなされてきている (Deardorff, 1972; Lin et al., 1996 など)。しかし、LES においては、格子間隔を十分に小さく取って大きな乱流は直接に計算しているものの、格子間隔より小さなスケール (サブグリッドスケール) の乱流の効果はパラメータ化して表現している。

現実の大気境界層は、レイノルズ数が非常に大きい上に、地表面に起伏があり、また植生、構造物などが存在している。そのような現実の条件での乱流の構造がどのような性状を示すのか、乱れの形成と発達がどのような機構によって支配されているのかを調べるのが重要な研究課題となっている。

実際の大気境界層における観測では、突風前線 (gust front) (Hayashi, 1992)、あるいは微細前線 (microfront) (Gao et al., 1989) と呼ばれる構造が示されているが、これらは地表に近い部分の境界層において得られたものであった。

この研究においては、比較的现象が単純であると考えられる、地表面加熱による影響が少なくほぼ中立な状態における場合を対象とし、大気境界層全層にわたる乱流構造の状況を詳細に調べることを目的とする。

2. これまでの大気境界層についての研究の概要

まず、比較対象のため、これまでに我々が進めてきた大気境界層の乱流構造に対する研究について、その概要を述べる。

2.1 潮岬における観測

1998 年から 2000 年にかけて、京都大学防災研究所附属災害観測実験研究センター潮岬風力実験所 (和歌山県西牟婁郡串本町) において実施した大気境界層の観測の概要を述べる。なお、観測の詳細は、堀口ら (2002) が報告している。

接地層において中立に近い安定度であった 1998 年 12 月 8 日に実施した観測を解析事例としている。この時の地上での超音波風速温度計による水平面内平均流方向の風速成分に連続ウェイブレット変換を施し、比

較的大きなスケールの構造を調べることを目的として、時間スケール 160 秒のウェーブレット係数が設定したしきい値以上になる場合をイベントとして抽出する。そして、ドップラーソーダによる各高度での風速成分について全イベントによる平均のパターンを作成すると、高度 200m 周辺でイベント中心より 30 秒程度前の時間を中心とした下降する強風域の構造が抽出される。

2.2 大気境界層乱流の数値実験

大気境界層乱流の数値実験の概要を述べる。なお、その初期的な結果は堀口ら（2003）が報告している。

使用した数値モデルは、米国オクラホマ大学ストーム解析予報センターが開発した ARPS (Advanced Regional Prediction System) であり、非静力学・雲解像モデルの一種である。今回の数値実験において、格子点数は水平方向 160×160 点、鉛直方向 80 点、格子間隔は水平方向 30m、鉛直方向 15m としている。サブグリッドスケールの乱流パラメタリゼーションには Smagorinsky スキームを使用し、境界条件については、側面が周期境界条件、下面については固定壁 (free-slip) 境界条件で、地表面による摩擦応力を与えている。

中立に近いがやや安定な成層をした風速が高度方向に一定である水平様な初期場に、領域全体にわたりランダムな温位擾乱を与えて、50000 秒間数値積分を行う。

計算結果について地表近くでの風速水平分布を見ると、平均流方向に伸びた筋状の構造が卓越している。上空ではこの構造は地表面近くと比較して平均流方向への伸び方が鈍くなっている。

地表面近傍での平均流方向風速成分に対するウェーブレット分散が最大となるスケールでのウェーブレット係数が設定したしきい値を越え、かつ極大となる場所をイベントの中心とする。そして、それを通る平均流方向鉛直断面について、全イベントを合成した風速分布図を作成すると、下降する動きを示す強風域の構造が風上方向に傾いて地表付近より高度 150m 程度まで広がっており、その前方に弱風域が存在していることが示される。また、そのスケールから、この構造は観測で得られたものに対応していると推測される。

数値実験の場合、地表面近くの高度での風速変動からイベントを抽出したので、ここで見られる構造は、地表面近くで顕著に見られる筋状の構造を上空まで鉛直方向に広げて見たものである。数値実験における筋状の構造は、上空から侵入してきた強風域の構造が地表面近くで大きな風速のシアにより引き延ばされたものであると推測することができる。

3. 信楽における大気境界層乱流の観測

京都大学宙空電波科学研究センター（現：生存圏研究所）信楽 MU 観測所（滋賀県甲賀郡信楽町）は、丘陵地帯に位置していて周囲の土地の起伏が大きいので接地境界層の観測のためには理想的な場所ではない。しかし、大気境界層全層にわたる風の観測が可能となる測器がそろっている。この場所における観測は 2000 年 10 月にも行い、その結果は堀口ら（2002）が報告しているが、その解析例では、風速は弱く、やや不安定な安定度を示している時間帯があるなど、あまり良い条件ではなかった。従って、今回はそれ以降に新たに観測した結果について述べる。

3.1 観測の概要

比較的风が強く、地上の日射による加熱も弱く中立な安定度となっていることが多いと思われる冬季、2001 年 12 月から 2002 年 3 月にかけての期間、信楽 MU 観測所において観測を実施した。使用した測器は、2 高度に設置した風向風速計（三杯風速計と矢羽型風向計からなる）（高度 4m と 17m）とサーミスタ温度計（高度 3m と 17m）、車載型ドップラーソーダ、及び L バンド下部対流圏レーダーである。2 高度に設置した風向風速計と温度計は接地層における安定度の測定に使用される。車載型ドップラーソーダは、従来のものから移動が容易なようにトラックに乗せられるよう改良されたものである。また、L バンド下部対流圏レーダーは、L バンド (1.3575GHz) の電波を使用する晴天大気レーダーで、対流圏下部までの高度での風速高度分布が観測可能である。

ここでは 2001 年 12 月 10 日 9 時 0 分～12 時 38 分にかけての観測例を解析した結果を報告するが、この時間をパート 1～4 に分けて解析する。この日、天候は晴であったが、多少の下層雲と思われる雲が見られた。パート 1～4 について、地上 17m での平均風速は 6.0, 6.7, 7.0, 7.2m/s、平均風向は 352, 353, 349, 354 度のほぼ北風であり、接地層における安定度の指標である安定パラメータ z/L (z : 高度, L : Monin-Obukhov の長さ) は -0.02, -0.02, -0.02, -0.02 と、ほぼ中立な状態であった。

大気境界層の厚さは、L バンド下部対流圏レーダーによるエコー強度の測定から見積もると、おおよそ 1100m 程度である。

3.2 強風域の平均構造

高度 17m に設置した風向風速計により各パートごとに平均流方向を定め、その方向の風速成分を u とする。Fig. 1 にパート 1 について、ドップラーソーダによる風速成分 u の時間高度断面図（上図）と風向風速計（高度 17m）による風速成分 u の時間変化（下図）を示す。

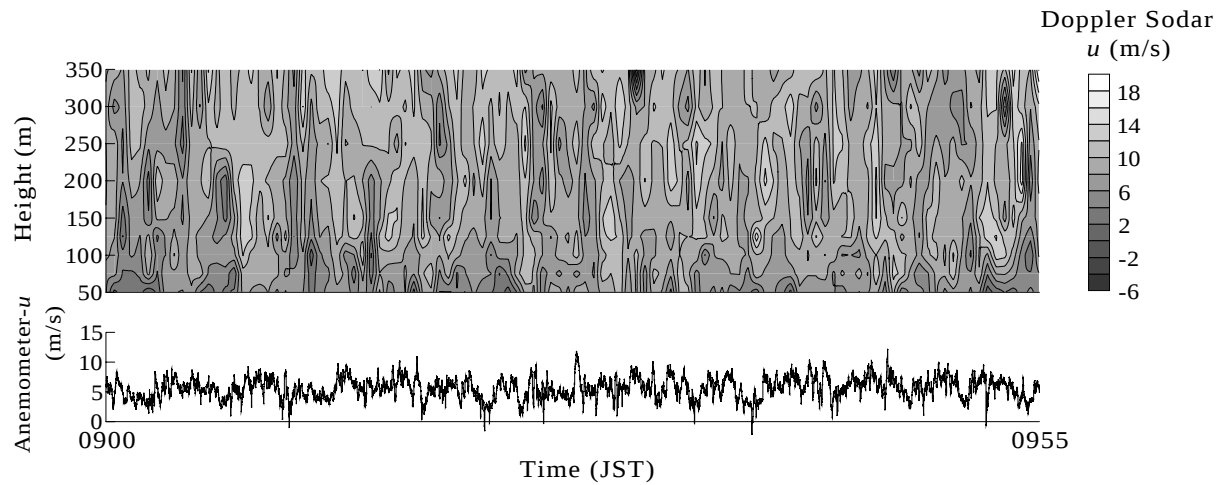


Fig. 1 time-height cross section of u component of velocity observed by the Doppler sodar (upper figure) and u component of velocity measured by the wind vane and anemometer (lower figure) (part 1)

ドップラーソーダによる観測では、数 10 秒から 2 分程度の時間スケールを持った強風・弱風域の構造が見られる。平均風速の高度分布は、地上からおよそ 125m 付近まで高度変化が大きく (Fig. 2), それより上では変化が小さくなって、一般的な高度分布の形を示している。また、平均風向の高度分布を見ると (Fig. 3), 風向の高度変化は小さく、周囲の地形による風向への影響は見られない。

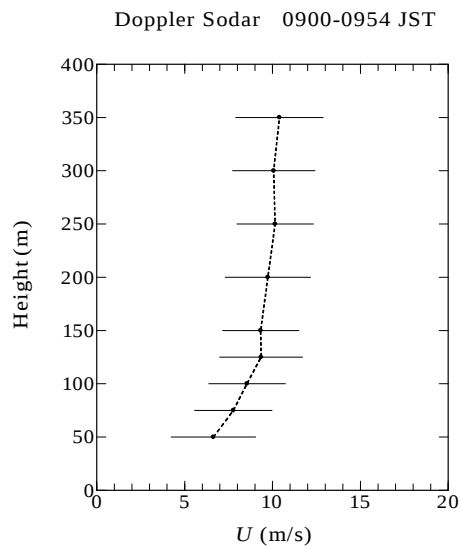


Fig. 2 Mean vertical profile of wind speed (horizontal bars mean standard deviations) (part 1)

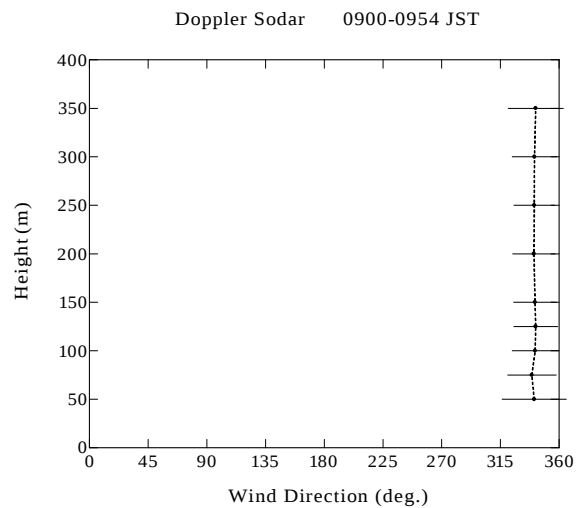


Fig. 3 Mean vertical profile of wind direction (horizontal bars mean standard deviations) (part 1)

ドップラーソーダによって示される強風域では下向きの鉛直風速 (風速成分 w) であることが多く、一方、弱風域では上向きの鉛直風速を示す場合が多い。従って、これらの構造に伴って運動量が下方に輸送されている。Fig. 4 にパート 1~4 の全期間における平均の $u'w'$ 値の高度分布を示す (u' , w' は各高度における各パートでの平均値からの偏差を示す)。 $u'w'$ がマイナスの値である場合、上空から下方に向かって運動量が輸送されていることになるが、地表から上空へ向かって運動量の輸送量は大きくなり、高度 300m で最大となっている。

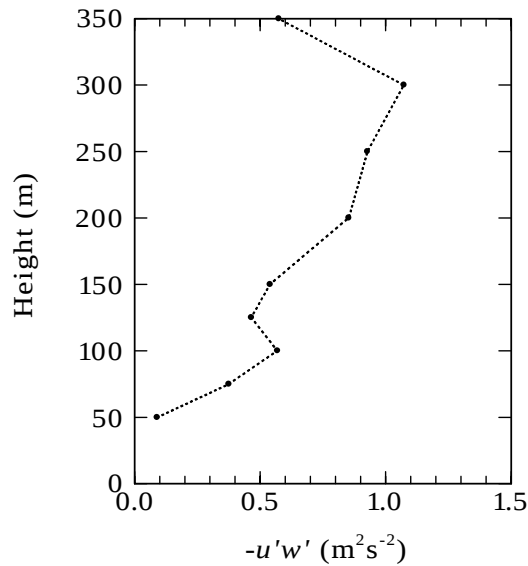


Fig. 4 Mean vertical profile of $u'w'$ (the value for $-u'w'$ is shown)

風速変動の特徴的な構造を調べるために、これまでの研究と同様に、ウェーブレット変換を使用する。また、ウェーブレットとしては、次式 (1) に示す“Mexican hat”関数を使用する（変数 t に対する関数 g として示す）。

$$g(t) = (1-t^2)\exp(-t^2/2) \quad (1)$$

この関数を使用するのは、この関数とフーリエ変換によって得られる関数がそれぞれの変数に対して良く局在化しており、代表的なウェーブレットとして広く使用されているからである。

高度 17m の風向風速計による風速成分 u について、各パートでの平均値からの変動成分をその標準偏差で規格化した値に対して連続ウェーブレット変換を施す。比較的大きなスケールの構造を調べることを目的として、時間スケール 160 秒のウェーブレット係数が設定したしきい値 (2.2m/s) 以上になる場合をイベントとして抽出する（パート 1～4 の全期間で 4 イベント）。そして、ドップラーソーダによる各高度での風速成分 u, w から、平均値からの偏差を標準偏差で規格化した値について、全イベントによる平均のパターンを作成する（Fig. 5）。その結果、高度 200m 周辺を中心とした上空側がやや前方（風上側）に傾いた下降する強風域の構造が抽出される。これは、潮岬で得られたもの（2.1 節）と同様な風速構造であり、大気の安定度が中立に近い条件における一般的な構造であると考えられる。

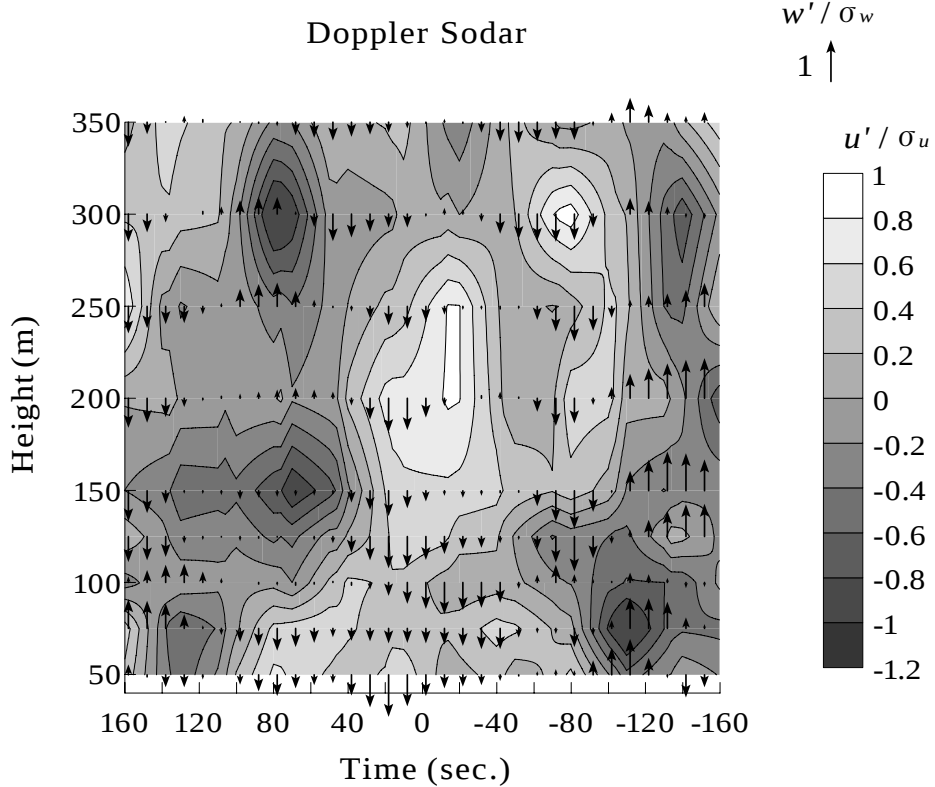


Fig. 5 Composite structure for u, w components of velocity

3.3 大気境界層全層にわたる風速構造

大気境界層全層にわたる乱流の構造を調べるため、地上17mでの風向風速計により定めた平均流方向の風速成分 u について、ドップラーソーダと下部対流圏レーダーのデータを調べる。

下部対流圏レーダーでは、大気境界層上層より上空の高度での風速が観測されている (Fig. 6) が欠測も多い。測定されるオリジナルのデータは西向き、南向きの各風速成分についてであり、それぞれで欠測があるので、ある方向への風速成分を抽出するのが困難となっている。そこで、地上での平均風向が全パートで北風に近いことから、南向き風速成分を平均流方向風速成分 (u) の近似値として使用し、データの欠測についても内挿して補完することとした。

特に数分程度の時間スケールを持った風速構造を調べるために、規格化した風速成分値に対して “Mexican

hat” 関数による連続ウェーブレット変換を施して、時間スケール 240 秒のウェーブレット係数についての時間高度断面図 (Fig. 7) を作る。この図を見ると、強風域の構造が鉛直方向にかなりの広がりを持っていることが分かる。この図に示すように、ドップラーソーダと下部対流圏レーダーのそれぞれの測器で風速構造を解析できる高度層の間には数百メートルのどちらによっても測定できていない層があり、両者によって解析された風速構造を明瞭に結びつけることはできない。しかし、数分程度の時間スケールを持った風速構造が時には大気境界層全層にわたるような鉛直構造を持つことが示唆されるような結果となっている。

同様な鉛直構造は 2000 年 10 月に行った観測でも得られており (堀口ら, 2002), 大気の安定度が中立に近い条件における一般的な様相を示していると考えられる。

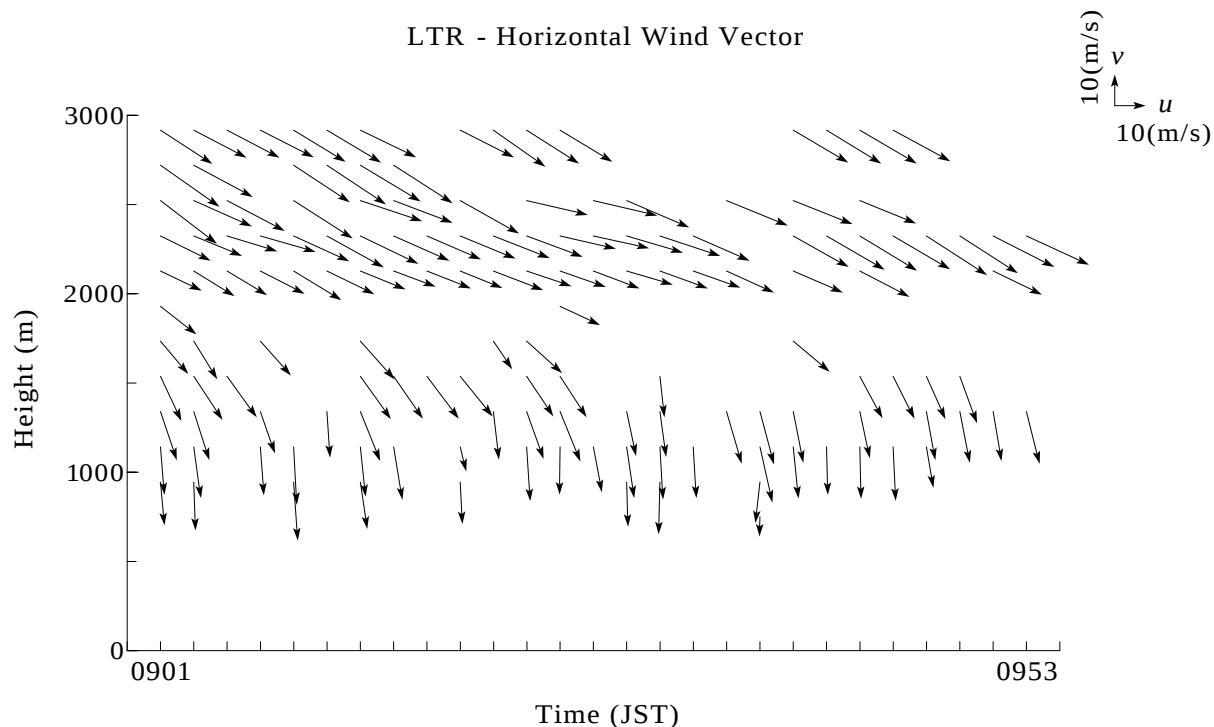


Fig. 6 Horizontal wind vectors measured by the lower troposphere radar (LTR)

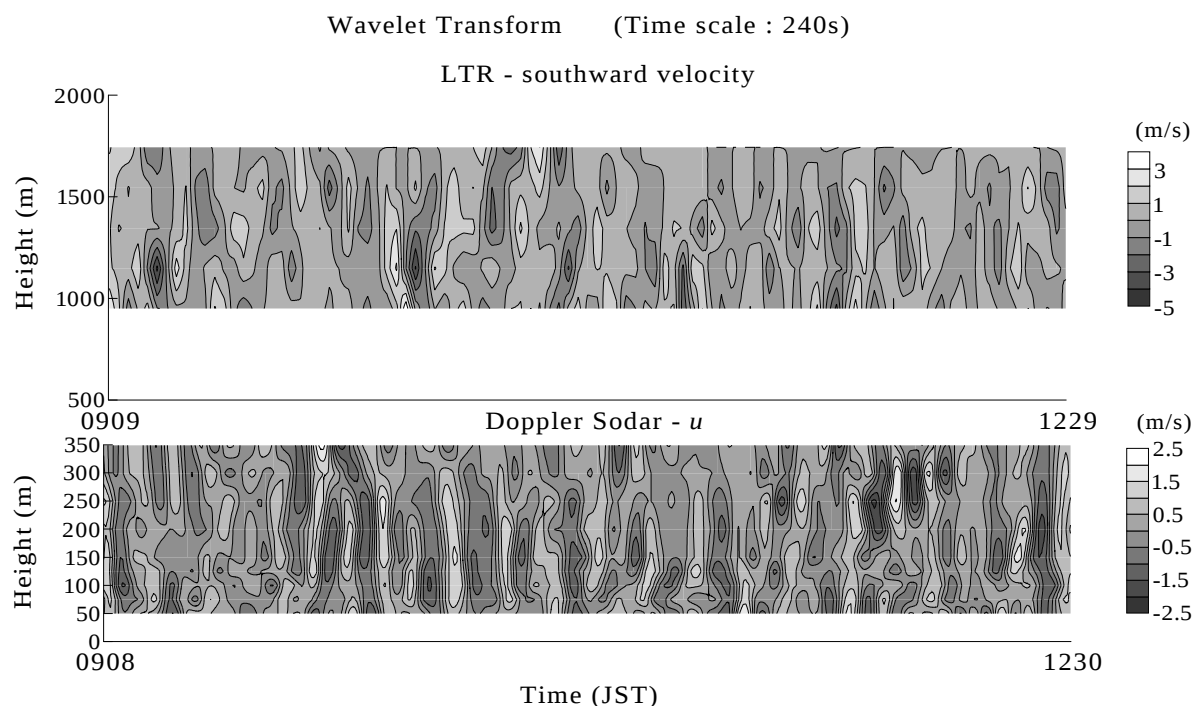


Fig. 7 Time-height cross sections of wavelet coefficients for u component of velocity measured by the Doppler sodar (upper figure) and the lower troposphere radar (LTR) (lower figure)

4. おわりに

信楽MU観測所において大気境界層乱流の観測を行い、大気境界層下層において地表へ向かって下降してきている風上方向に傾いた強風域の構造、及び、鉛直方向にかなりの拡がりを持った風速構造の存在を示した。

今後については、乱流構造の大気境界層全層にわたる状況を数値実験結果と比較対照しながら、より定量的にも検討するため、今回その一部について報告した信楽MU観測所で行った観測についてのデータ解析と、それに合わせて数値実験もさらに進める予定である。

謝 辞

潮岬風力実験所と信楽MU観測所での観測に際して、潮岬風力実験所と宙空電波科学研究センター（現：生存圏研究所）の方々、そして研究全体を通じて（株）カイジョーソニック伊藤芳樹代表取締役専務に御協力と御援助をいただいた。また、数値実験については、米国オクラホマ大学ストーム解析予報センターが開発した数値モデル ARPS (Advanced Regional Prediction System) を使用した。なお、本研究における観測は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (C)「大気境界

層における乱流の空間構造とその時間発展に関する研究」（課題番号 13640437）の援助を受け実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 堀口光章・植田洋匡・林 泰一 (2002): 中立成層状態の大気境界層における組織的乱流構造, 京都大学防災研究所年報, 第 45 号 B, pp. 347-355.
- 堀口光章・植田洋匡・林 泰一 (2003): 中立成層状態の大気境界層における組織的乱流構造 (第 2 報), 京都大学防災研究所年報, 第 46 号 B, pp. 469-477.
- Corino, E.R. and Brodkey, R.S. (1969): A visual investigation of the wall region in turbulent flow, Jour. Fluid Mech., Vol.37, pp. 1-30.
- Deardorff, J.W. (1972): Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers, Jour. Atmos. Sci., Vol.29, pp.91-115.
- 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.
- Hayashi, T. (1992): Gust and downward momentum transport in the atmospheric surface layer, Boundary-layer

- Meteorol., Vol. 58, pp.33-49.
- Kline, S.J., Reynolds, W.C., Schraub, F.A. and Runstadler, P.W. (1967): The structure of turbulent boundary layers, Jour. Fluid Mech., Vol.30, pp.741-773.
- Lin, C.-L., McWilliams, J.C., Moeng, C.-H. and Sullivan, P.P. (1996): Coherent structures and dynamics in a neutrally stratified planetary boundary layer flow, Phys. Fluids, Vol.8, pp.2626-2639.

Observations for the Turbulent Structures in the Planetary Boundary Layer at Shigaraki

Mitsuaki HORIGUCHI, Taiichi HAYASHI, and Hiromasa UEDA

Synopsis

Spatial turbulent structures for the whole layer in the nearly neutral planetary boundary layer are observed at Shigaraki MU Observatory. In the lower boundary layer, upwind tilting structures of high-speed area are approaching to the surface. The turbulent structures with larger time scale have considerably large vertical extent.

Keywords: planetary boundary layer, turbulence, coherent structure, momentum flux, lower troposphere radar