

中立に近い大気境界層における組織的乱流構造 —気象研究所気象観測鉄塔での観測例—

堀口光章・林泰一・足立アホロ*・小野木茂*

* 気象庁気象研究所

要 旨

安定度が中立に近い大気境界層における組織的な乱流構造について、つくば市にある気象研究所気象観測鉄塔（高さ213m）での乱流観測データを使用して解析を行った。中立に近い安定度の観測例からウェーブレット分散スペクトルにより、高度200mのような上空において大きな時間スケールの風速変動が卓越して存在することが示される。この時間スケール（200秒）の構造をウェーブレット解析により調べると、鉛直方向に広がった強風の乱流構造が断続的に出現している。この乱流構造中では、下方への運動量輸送が全時間にわたる平均より大きくなり、また乱れ（乱流運動エネルギー）も大きくなっている。

キーワード：大気境界層，気象観測鉄塔，ウェーブレット，乱流構造，運動量輸送

1. はじめに

境界層乱流中に現れる組織構造（ある大きさの領域で現れる，秩序だった動きなどを示す構造）は，熱や運動量の輸送と乱れの生成に対して重要な寄与をなすことが室内実験などにより調べられている（Kline et al., 1967; Corino and Brodkey, 1969 など）。この研究で対象とする大気境界層では実験における条件とは異なり，流れが速くその空間スケールも大きくて非常に大きなレイノルズ数（運動方程式の移流と粘性による項の大きさの比に相当する無次元数）となっている。さらに基本的な状態として水平風速の鉛直シアーによる乱流の生成が支配的であり浮力による影響が少ないと考えられる中立に近い安定度における大気境界層を考える。そのような大気境界層において組織的な乱流構造が存在するのか，またその運動量輸送や乱れに対しての役割はどの程度であるのかについて調べることは，例えば地上近くで強風が吹く条件を考える上でも重要な課題である。

このような研究動機により，京都大学防災研究所附属流域災害研究センター潮岬風力実験所（和歌山県東牟婁郡串本町）で1998年11，12月に行った観測と，京都大学生存圏研究所信楽MU観測所（滋賀県甲賀市）で2001年12月から2002年3月にかけて

に行った観測により，比較的大きな時間スケールを持った下降する強風の乱流構造が示され（Horiguchi et al., 2010），実験により調べられてきた組織構造に対応するものと考えられた。

さらに，組織的乱流構造のより詳細な構造と接地層より上の高度を含めての運動量輸送や乱れへの影響を調べるために気象研究所気象観測鉄塔（高さ213m）（茨城県つくば市）での観測データを解析している（堀口ら，2008）。今回は，この場所での観測データより，新たに解析した観測例についての結果を報告する。

2. 気象研究所気象観測鉄塔での観測とデータの概要

気象研究所気象観測鉄塔は，1975年に筑波研究学園都市の南部にある気象研究所敷地内に建設された気象観測用の鉄塔で，高さは213mである。この鉄塔周囲の地形については，その北方約20kmに標高876mの筑波山が位置しているが，それより近くの地形は比較的平坦である。また鉄塔周囲の大きな建物としては，気象研究所本館（高さ約41m）が鉄塔の北東約250mにあり，その方向から風が吹く場合にはかなり高い位置まで観測される乱流へ影響があるものと思われる。さらに観測鉄塔周辺の地表面状態

について見てみると、高さ 10～20m 程度の林や建物が散在しており、それらによる風への影響も考えなくてはならない。

観測鉄塔の構造は、一辺が4mの正三角形をしており、6高度（10, 25, 50, 100, 150, 200m）に鉄塔本体各辺に沿って水平支柱が各高度3本設けられ、鉄塔の端から長さ6m突き出たその先端に観測機器が設置できるようになっている（花房ら、1979）。乱流データについては、各高度に設置された三次元超音波風速温度計によりサンプリング周波数10Hzで観測がなされた。

なお、鉄塔による影響を避けるため、三方向に伸ばされた各水平支柱の先端に同じ測器を設置、高度213mの鉄塔頂部に設置された二次元超音波風速計により測定される風向に応じて切り替えを行い、その風向に向いた位置の測器のデータを記録している。さらに、平均的气象要素の測定のために、各高度にプロペラ型風向風速計、白金抵抗温度計、容量型湿度計が設置され、測定値が記録されている。

建設以降、観測が継続されてきたが、今回は1999年から2002年にかけて収録されたデータのうち、安定度が中立に近い条件での観測例を解析する。

3. 観測例の解析

3.1 大きなスケールの強風の乱流構造

観測データの解析において、乱流統計量の扱いの際の平均化時間を30分としてデータはこの時間（各パート）ごとに処理する。そして、接地層を代表する高度として地表面からそれほど離れていない高さ25mを考え、この高度での超音波風速温度計による乱流測定と白金抵抗温度計による平均気温測定から Monin-Obukhov 安定パラメータ (z/L , z は測定高度, L は Obukhov の長さ) を求め、観測時の安定度の指標として使用する。Monin-Obukhov 安定パラメータは、浮力による乱流生成率とシアーによる乱流生成率の比に対応し、値が0に近い場合は浮力による乱流生成が小さい場合であり、ここで中立に近いというのはこの状況に相当している。

また、同じ方向への風速成分を考えるために、水平面内の平均流方向を上記高度25mの風について求め、その他の高度における平均流方向風速成分 (u) もこの高度25mにおける平均流方向についての風速成分を取ることとする。一方、地表面の起伏や超音波風速温度計の取り付け状態により風が風速計の基準面（測器の水平面）から平均的にもある傾斜を持って吹いている（場合によっては吹き上げあるいは吹き下ろしがある）可能性がある。そこで、三次元的に平均流方向を定め、各種輸送量についてはその

平均流ベクトルを含む鉛直断面内（超音波風速温度計の基準鉛直軸を含む面）で平均流ベクトルに直交する上向き方向について考える。

ここでは、安定度が中立に近い状態が長時間継続した2000年3月19日14時30分～18時30分における観測例を示す。これは以前（堀口ら、2008）に示した観測例（2000年2月28日13時30分～14時30分）とは別の例であり、より長時間のデータについて、またより詳しく解析を行う。この2000年3月19日の天候は、気象研究所に隣接する気象庁高層気象台（館野）での観測によれば（気象庁ホームページ～「気象統計情報」参照）15時に曇であった。そして、この時の Monin-Obukhov 安定パラメータの値は、各パートにおいて-0.04から0.02までの範囲の値であり、中立に近い条件であった。

風の様相として高度25mにおける各パートでの平均風速と風向を見てみると、風速（水平風速）は $3.8 \sim 5.3 \text{ ms}^{-1}$ 、風向は $185 \sim 199$ 度の範囲にあり大きな変化はなく、また気象研究所本館の影響がないと思われる南寄りの風であった。

この日の例について風速の乱れの高度変化を見ると、高度25mでは（三次元的な）平均流方向風速成分の標準偏差が 1.5 ms^{-1} であり、上下の高度10mでの 1.2 ms^{-1} 、50mでの 1.2 ms^{-1} に比較して乱れが大きくなっている。これは、観測鉄塔周辺の粗度物体（林や建物）によりこの高度付近では大きな乱れが引き起こされていることを示唆している。そこで、安定度や（水平面内の）平均流方向を定める際に考える基準高度は、25mではなく50mを使用した方が良いかもしれない。実際に高度50mの測定データから Monin-Obukhov 安定パラメータ (z/L) を見積もると-0.21から0.13（8パートのうち2パートでは超音波風速温度計による温度変動データに異常があり z/L 値を評価できていない）と多少大きな値が得られる。元来、Monin-Obukhov 安定パラメータ (z/L) では同じ輸送量を示す層内でも測定高度 (z) によって値が変化するので、高度25mの場合より50mの測定データから評価する場合では広い z/L の値の範囲を中立に近いものとして考えて良いかもしれない。この点については、他の観測例の場合も合わせてさらに検討する必要がある。また、高度25mと50mでの平均流方向の差は各パートで $6.0 \sim 8.3$ 度であり、どちらの高度の平均流方向を使用するかによる各高度の u 風速成分の値に与える影響は大きくない。

なお、観測鉄塔周辺における粗度物体（林や建物）による流れへの影響についての指標として、高度25mでの平均風速と運動量輸送量の測定から風速高度分布が対数則を満たすことを仮定して粗度長 (z_0) を見積もると、この観測例の8パートの平均値として

2.0mという値が得られる。また乱れの大きい高度25mの代わりに高度50mの測定データから粗度長を見積もり直すと1.1mとなる。なお、より厳密な粗度長の見積りについては、ゼロ面変位 d （粗度の大きな地表面で必要となる対数則での高度 z の原点についての修正量、 z を $z-d$ で置き換える）を合わせて見積もることを検討する必要がある。

この日の観測例から、14時30分～15時（パート1）の時間帯における超音波風速温度計による各高度での（水平面内）平均流方向風速成分（ u ）の時間変化を見る（Fig. 1）。水平方向の風速は鉛直方向の風速に比べてかなり大きく、水平方向の風速を調べる際に三次元的な平均流を考えるかどうかの影響は小さいので、ここでは同じ方向の風速成分を考えるため

に水平面内での平均流方向（高度25mを基準）の風速成分を使用している。

図を見ると、100～200秒程度の比較的長い時間スケールを持った強風の風速変動（図中、赤色の矢印でその例を示す）が、鉛直方向に同じような時刻に現れており、鉛直方向に広がった構造を持っていることが分かる。これより短い時間スケールの風速変動は、鉛直方向での同時性、すなわち鉛直方向への広がりの程度が小さくなる。

Fig. 1 は一つのパート（30 分間）についての例であったが、その他のパート（時間帯）についても同様な比較的長い時間スケールの強風の風速変動が見られる。

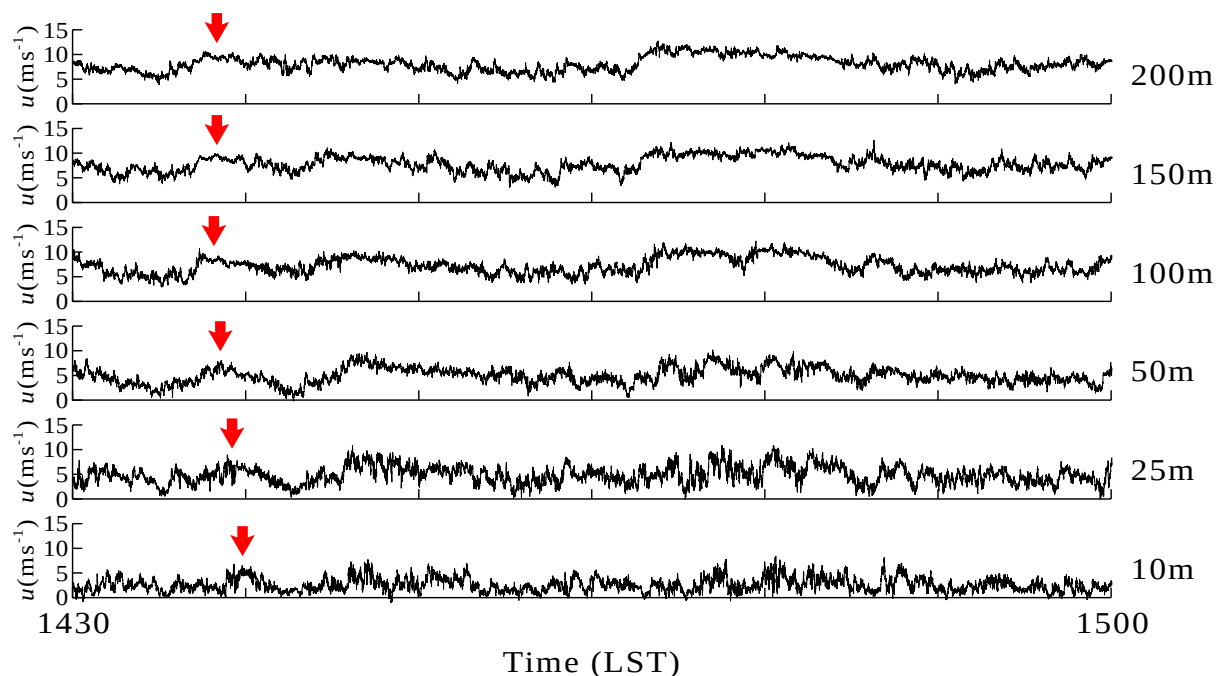


Fig. 1 Time series of the streamwise velocity component (u) observed by sonic anemometers at each level from 1430 to 1500 LST on March 19, 2000 at the meteorological tower of MRI in Tsukuba. Red arrows denote typical large-scale regions of high-speed velocity

ここで、風速の高度分布について見てみる。Fig. 2は高度 25m の風を基準とした（水平面内）平均流方向風速成分（ u ）の高度分布について、4 時間にわたる平均を左側の図では高度を普通の線形軸上に、右側の図では高度を対数軸上に表したものである。

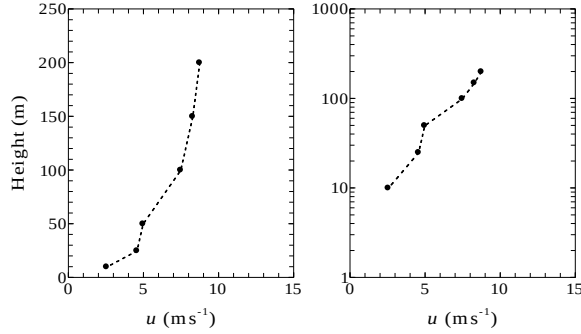


Fig. 2 Mean vertical profiles of the streamwise velocity component (u) from 1430 to 1830 LST on March 19, 2000

この図を見ると、高度 200m の風まで、全体的にはおおよそ対数則に合うような風速高度分布を示しているが、25m 以下と 50m 以上では分布の連続性が低い。高度 25m で大きな乱れが見られることと関連し、それぞれの層でゼロ面変位の値も合わせて風の高度分布の形を考えた方が良いように思われる。これについては、安定度や平均流方向を定める際の基準高度の選び方に関係して、他の観測例も合わせてさらによく調べる必要がある。

ここで、特定の時間スケール（長さ）を持った風速変動を抽出するために（水平面内）平均流方向風速成分（ u ）の時系列に対して連続ウェーブレット変換を行う。連続ウェーブレット変換は、連続データ中に不規則に現れる変動を抽出するのに使用される解析手法であり、変数 t についてのデータ列 $x(t)$ に対して、変動の大きさに対応するスケールパラメータ a 、変動の位置に対応するトランスレーションパラメータ b についてのウェーブレット係数 $T(a, b)$ は次式 (1) に示す通りである。

$$T(a, b) = \left(\frac{1}{a} \right) \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) x(t) dt \quad (1)$$

ただし、 $\Psi(t)$ は変数 t についてのマザーウェーブレットであり、 $*$ は複素共役を示す。

実際には、30 分間での平均値からの変動成分（ u' ）を標準偏差（ σ_u ）で規格化した時系列データを作成

し、さらにスケールのごく小さな変動成分を除くために 20 個ずつのブロック平均を施したデータに対してウェーブレット変換を行っている。また、マザーウェーブレットとしては、これまでの潮岬と信楽における観測結果の解析（Horiguchi et al., 2010）と同様に、次式 (2) および Fig. 3 に示す“Mexican Hat”関数を使用する。

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

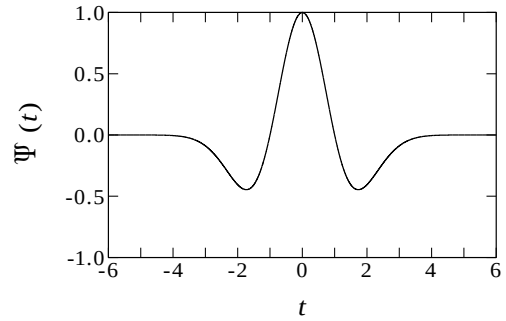


Fig. 3 “Mexican Hat” wavelet function

また、不規則に現れる変動のスケール分布（大きさの分布）をウェーブレット変換により求められるウェーブレット分散スペクトル（ $W(a)$ ）により調べることができる（Collineau and Brunet, 1993; Thomas and Foken, 2007）。その定義は次式 (3) の通りである。

$$W(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |T(a, b)|^2 db \quad (3)$$

Fig. 4 に 2000 年 3 月 19 日 14 時 30 分～18 時 30 分における観測例についてのウェーブレット分散スペクトルを示す。図の横軸はウェーブレット解析において定義される「時間スケール」で、スケールパラメータ a の 2 倍の大きさであり、“Mexican Hat”関数の場合にはその関数の中心（Fig. 3 で $t=0$ ）前後の関数値がプラスの範囲の長さに相当する。

結果のウェーブレット分散スペクトルを見ると、上空の高度 (150, 200m) では大きな時間スケール（高度 200m では 200 秒）にウェーブレット分散スペクトルのピークがあり、Fig. 1 の平均流方向風速成分の時間変化に見られる比較的長い時間スケールの風速変動に対応すると考えられる。

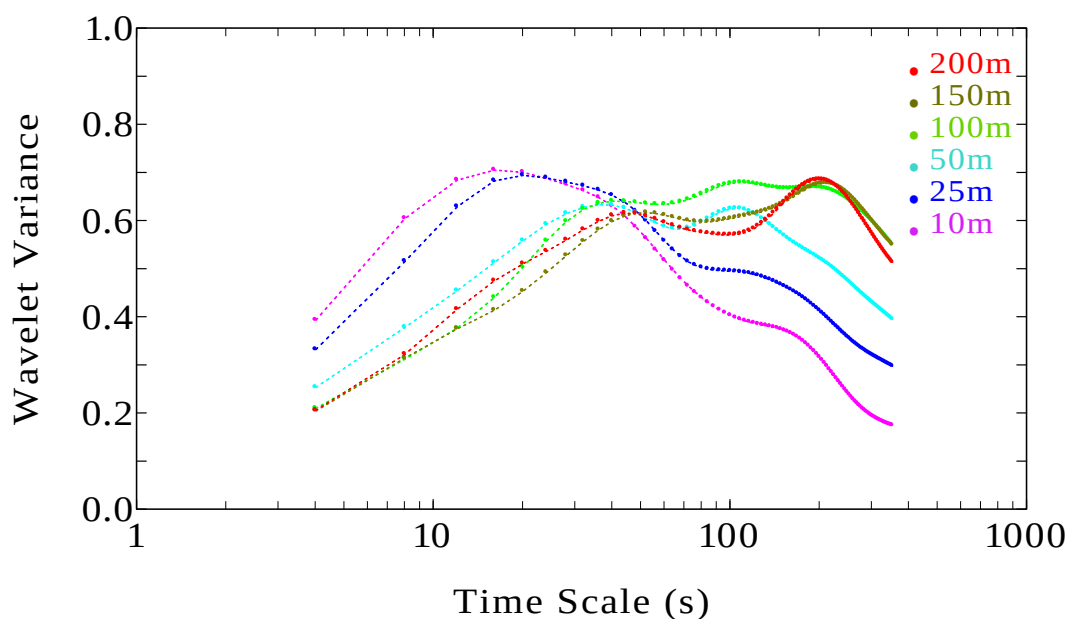


Fig. 4 Wavelet variance spectrum for the streamwise velocity component at each level from 1430 to 1830 LST on March 19, 2000

高度200mのような上空でウェーブレット分散に大きな値が見られる比較的大きな時間スケール（200秒）について、2000年3月19日14時30分～18時30分における各高度の平均流方向風速成分に対するウェーブレット係数から時間高度断面図を作成する。そしてウェーブレット係数にしきい値（ここでは0.5とする）を決めてそれ以上の領域（明るい色で示す）を強風の乱流構造として抽出したのがFig. 5である。

この図を見ると、鉛直方向に広がった構造が断続

的に出現している様子が明瞭に示される。この強風の乱流構造の高度200mにおける平均出現時間間隔は520秒であり、これを同じ高度の平均風速（平均流方向風速成分の平均） 8.7ms^{-1} から平均流に乗って乱流構造が流されていることを仮定して（Taylorの凍結乱流の仮説）空間間隔に換算すると4,600mとなる。この平均出現間隔は、潮岬と信楽での観測（Horiguchi et al., 2010）から得られた3,800～5,400mの値の範囲に入っている。

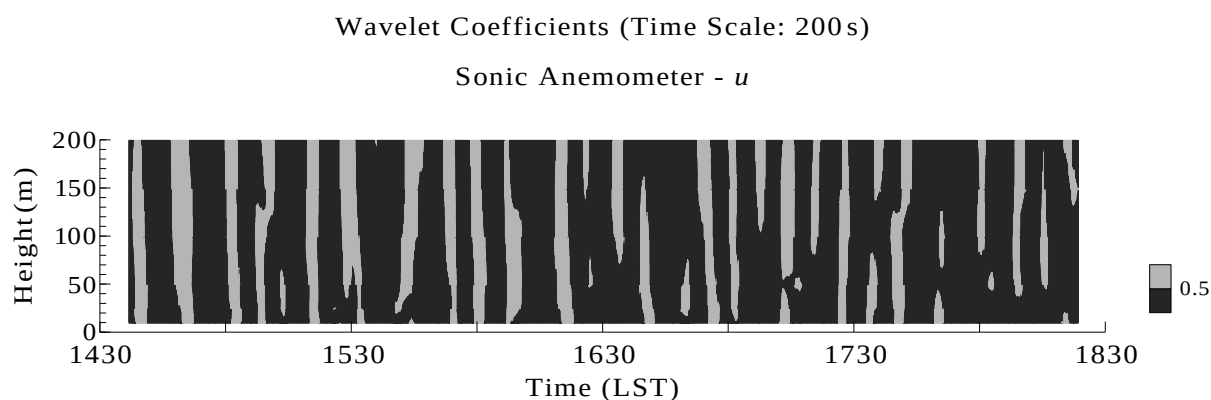


Fig. 5 Time-height cross-section of wavelet coefficients (time scale of 200 s) for the streamwise velocity component from 1430 to 1830 LST on March 19, 2000. Areas of light tone denote the regions in which the wavelet coefficient is larger than the threshold value (0.5)

このように、この解析で示された強風の乱流構造は、これまで潮岬と信楽において高度 350m 程度までのドップラーソーダ観測で示されたもの (Horiguchi et al., 2010) と同様な構造であると考えられる。

3.2 強風の乱流構造による運動量輸送や乱れへの影響

強風の乱流構造において運動量輸送がどのように変化しているのかを調べるために、2000年3月19日の例における強風の乱流構造中での $-u'w'$ 値(瞬时レイノルズ応力)の平均(乱流による下向きの運動量輸送量に対応)と全時間帯での平均を比較したのがFig. 6である。また、ここでも u' と w' 値は三次元的に平均流方向を定める方法により求めている。なお、地表近くに比べて上空の方が風速は強く、平均的に見て運動量の輸送は下向きであり、 $u'w'$ の値が負である場合、下方に向かっての運動量輸送に寄与することになる。この図を見ると、強風の乱流構造において下向きの運動量輸送は、高度によるが全時間帯での平均より1.5倍程度(最大は高度10m)まで大きくなっていることが分かる。

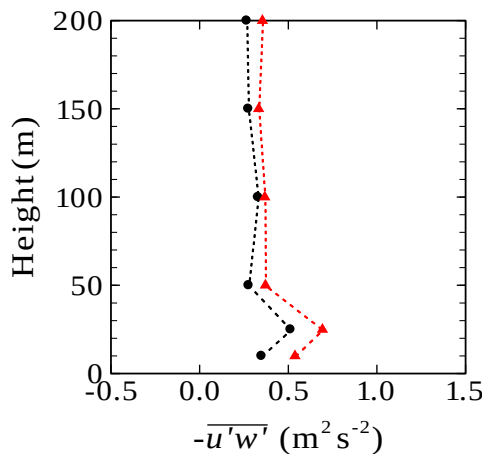


Fig. 6 Comparison between the average values of $-u'w'$ in the high-speed turbulence structures ($\blacktriangle$) and the overall average values for the entire period ($\bullet$) on March 19, 2000

次に運動量輸送に関連して、平均流方向(u)と鉛直方向(w)の風速成分の変動特性を乱流変動の四象限分類により検討する。四象限分類は、乱流変動を u, w それぞれの平均値からの変動成分の正負により、第1象限($u' \geq 0, w' \geq 0$)、第2象限($u' < 0, w' \geq 0$)、第3象限($u' < 0, w' < 0$)、第4象限($u' \geq 0, w' < 0$)に分類するものである。これらのうち、第2象限に

位置する低速流の上昇運動をイジェクション、第4象限に位置する高速流の下降運動をスウィープと呼び、下方への運動量輸送に寄与する乱流運動である。ここでは、これらによる運動量の輸送を比較する。また、ここでも三次元的に平均流方向を定める方法により u' と w' 値を求めている。Fig. 7は2000年3月19日の例についての解析結果である。

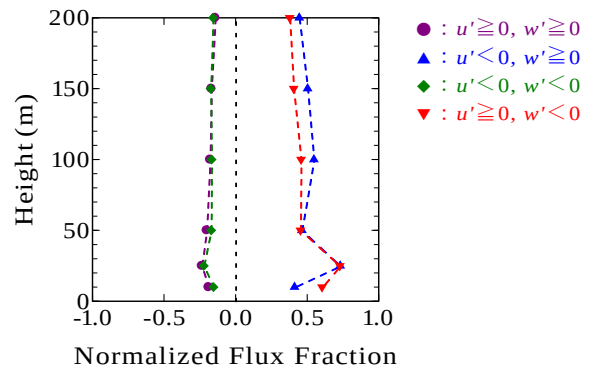


Fig. 7 Profiles of the flux fraction of each quadrant for the velocity fluctuation based on sonic anemometer data from 1430 to 1830 LST on March 19, 2000. Values are normalized with respect to the total $u'w'$ at the 25m level

この図を見ると、上空(高度100mより高い位置)ではイジェクションによる運動量輸送への寄与の方が大きく、高度50mと25mでは同程度、地表に近い高度10mではスウィープによる寄与の方が大きいことが分かる。運動量輸送への寄与についてのこの観測は、地表近くを除きイジェクションによる寄与の方が卓越するというこれまでの数値実験による研究 (Lin et al., 1996; Drobinski et al., 2007) と同様な結果を示している。運動量輸送についてイジェクションによる寄与が全般的に大きい、地表近くの高度では下方への空間が小さい(地表に近い)ので、下方からの運動であるイジェクションによる運動量輸送が小さくなり、スウィープによる方が割合として大きくなるということが説明として考えられる。

ここまで取り扱ってきた強風の乱流構造において、乱れの強度が変化しているのかを調べるために、乱流運動エネルギー $e (=0.5 \times (u'^2 + v'^2 + w'^2))$ (瞬时値)について、強風の乱流構造中での平均と全時間帯での平均とを比較したものがFig. 8である。ただし、 v' は平均流に水平面内で直交する方向の風速成分の変動成分である。ここでも三次元的に平均流方向を定める方法により u', v', w' 値を求めて計算したが、その値は(エネルギーの物理量であるから)座標変換によらない。

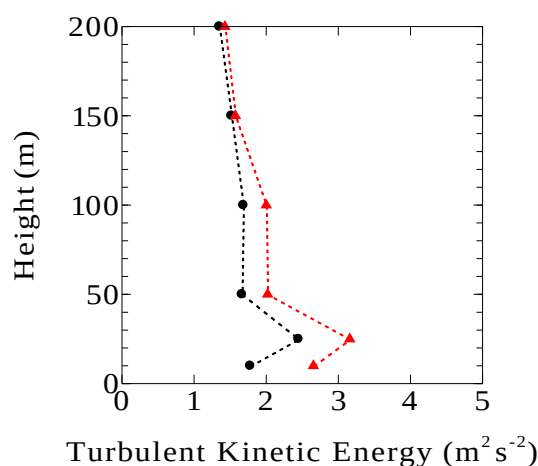


Fig. 8 Comparison of turbulent kinetic energy between the average values in the high-speed turbulence structures (▲) and the overall average values for the entire period (●) on March 19, 2000

この図を見ると、強風の乱流構造中で乱流運動エネルギーは大きくなっていることが分かる。例えば高度50mでは21%増加しており、下層における方がその増加の割合は大きい。

3.3 他の観測例との比較

ここで、同じ中立に近い条件の別の日の状況について見てみる。Fig. 9は3月18日15時30分から19時30分にかけての観測例についてのウェーブレット分散

スペクトルである。この図を見ると、3月19日の観測例に見られるような上空（高度200m）での大きなスケールでのウェーブレット分散スペクトルのピークは見られない。ただし、ウェーブレット分散スペクトルは相対的な各スケールでの変動の大きさを示すものであり、上空の高度で大きな時間スケールの構造がないわけではない（分散はある程度の値を持っている）。なお、高度150mでは大きな時間スケールで少し分散の値が大きくなっており、より下層の高度100mでは224秒の時間スケールのところで明瞭なピークが見られている。

同じ中立に近い条件でも、観測例により、上空での大きな時間スケールでの構造についてウェーブレット分散スペクトルで見た時に違いが現れる理由について、今後より詳しく調べていく予定である。

なお、大きなスケールを持った構造による運動量輸送や乱れへの寄与について、いくつかの例で同じようなスケールの構造による寄与を調べようとする際、測定時のサンプリングに基づいた時間スケールで見るのか、平均風速に乗って乱流構造が流されていることを仮定して空間スケールで見るのかということが問題となる。空間スケールを固定し、それを各観測例の平均風速から時間スケールに変換し、その時間スケールの構造を調べるという方法も考えられる。ただし、この場合には平均風速で乱流構造が流されているという仮定がどの程度妥当であるかについて検討する必要がある。

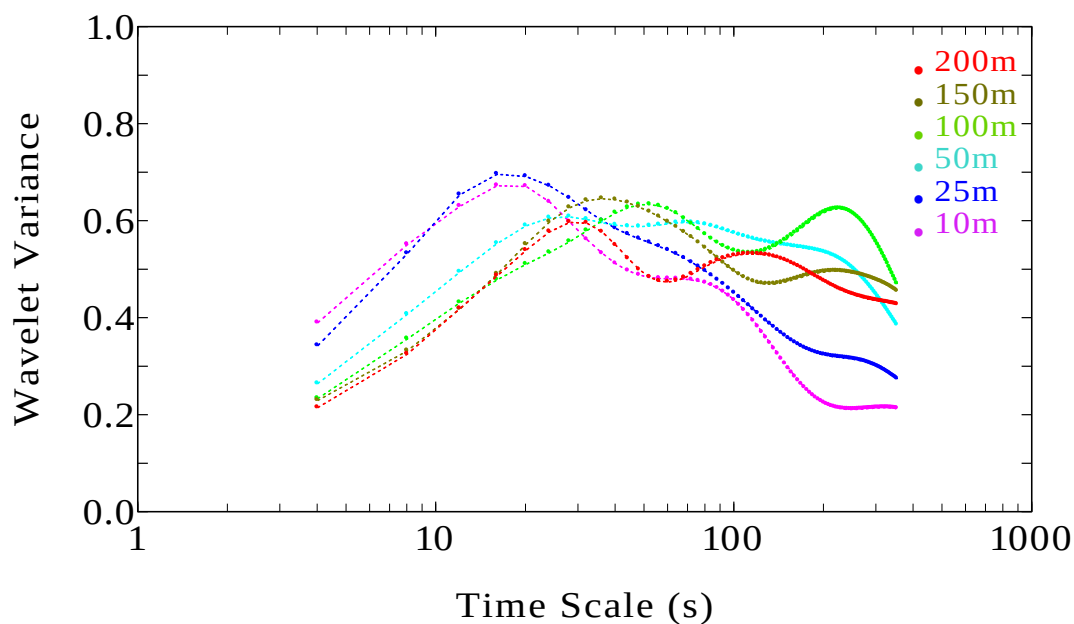


Fig. 9 Wavelet variance spectrum for the streamwise velocity component at each level from 1530 to 1930 LST on March 18, 2000

4. おわりに

今回は気象研究所気象観測鉄塔による観測データより、中立に近い条件での観測例についての解析結果を報告した。今後、多くの似たような状況での観測例を解析し、中立に近い安定度における大気境界層での組織的な乱流構造の様相とその寄与について詳しく調べていく予定である。

参考文献

花房龍男・藤谷徳之助・伴野 登・魚津 博 (1979) : 筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設, 気象研究所技術報告, 第3号, 50 pp.

堀口光章・林 泰一・足立アホロ・小野木 茂 (2008) : 大気境界層における乱流構造—気象研究所気象観測鉄塔(つくば)による観測—, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp. 449-455.

Collineau, S. and Brunet, Y. (1993): Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy. Part I: Wavelet analysis, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 65, pp. 357-379.

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.

Drobinski, P., Carlotti, P., Redelsperger, J.-L., Banta, R.M., Masson, V. and Newsom, R.K. (2007): Numerical and experimental investigation of the neutral atmospheric surface layer, *Jour. Atmos. Sci.*, Vol.64, pp. 137-156.

Horiguchi, M., Hayashi, T., Hashiguchi, H., Ito, Y. and Ueda, H. (2010): Observations of coherent turbulence structures in the near-neutral atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 136, pp. 25-44.

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.

Thomas, C. and Foken, T. (2007): Organised motion in a tall spruce canopy: temporal scales, structure spacing and terrain effects, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 122, pp. 123-147.

Coherent Turbulence Structures in the Near-Neutral Atmospheric Boundary Layer —Observation Cases by the Meteorological Tower of MRI—

Mitsuaki HORIGUCHI, Taiichi HAYASHI, Ahoro ADACHI* and Shigeru ONOGI*

* Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Synopsis

Coherent turbulence structures in the near-neutral atmospheric boundary layer are analyzed using turbulence data observed by the meteorological tower (213-m tall) of the Meteorological Research Institute (MRI) in Tsukuba. Wavelet variance spectra for the observation case in near-neutral stability show dominant wind speed variations with a long time scale at higher levels (e.g. 200-m height). Based on the wavelet analysis with this time scale (200 s), intermittent high-speed turbulence structures with large vertical extent are extracted. These turbulence structures indicate a large contribution to downward momentum transfer and large turbulence (turbulent kinetic energy).

Keywords: atmospheric boundary layer, meteorological tower, wavelet, turbulence structure, momentum transfer