

中立に近い安定度における大気境界層乱流の構造

潮岬と信楽における観測

堀口光章・林 泰一・植田洋匡

要 旨

中立に近い安定度の大气境界層における乱流の構造を潮岬風力実験所と信楽 MU 観測所において観測した結果を解析した。時間スケール 200 秒程度の比較的大きな強風域の構造による運動量輸送への寄与は平均値に比べて 2 倍程度まで大きい。地表近くでの運動量輸送への寄与は 100 秒程度のスケールの乱流変動によるものが大きく、また、イジェクション（低速流の上昇運動）よりもスウィープ（高速流の下降運動）の乱流運動による運動量輸送の方がやや寄与が大きい場合が見られる。そして、これらのことと強風域の構造との関連が示唆される。

キーワード：大気境界層，乱流，組織構造，運動量輸送，ドップラーソーダ

1. はじめに

室内実験や数値実験により、境界層乱流中に組織構造が存在し、乱れの生成と乱流輸送に大きな寄与をなしていることが示されている（Kline et al., 1967; Corino and Brodkey, 1969 など）。しかしこれらの実験では、粘性と移流による作用の相対的な大きさの違いを表すレイノルズ数が小さい条件、あるいは壁面に近い領域を対象にしたものが多い。

一方、大気境界層は非常に大きなレイノルズ数となっている。その大気境界層の地表近くで、微細前線（microfront）や突風前線（gust front）と呼ばれる強風域の構造が観測で示されている（Gao et al., 1989; Hayashi, 1992）。これらは大気境界層乱流中で現れる組織構造の一形態と考えられるが、観測は大気境界層でも地表に近い部分のみについて行ったものであった。

この研究では、比較的現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接地層の安定度が中立に近い場合を対象として、乱流構造とそれによる運動量輸送を観測により大気境界層内の広い高度範囲にわたり調べることを目的としている。

これまで同様な研究課題について、観測と数値実験の結果を解析してきたが、今回は特に観測結果について新たに解析した点を中心として報告する。

2. 大気境界層乱流の観測の概要

2.1 潮岬における観測

京都大学防災研究所附属流域災害研究センター（観測当時は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）は、台地状の地形をした岬の南西端近くに位置しており、付近に大きな建物などがなく、大気境界層観測に適している。この場所で行った観測の概要を述べる。

観測は 1998 年 11、12 月に実施し、超音波風速温度計を本館測風塔（地上からの高さ約 20m）に設置して地表近くの気流と接地層の安定度を測定し、ドップラーソーダ（カイジョー製 AR-1000）と宙空電波科学研究所（現：生存圏研究所）が設置した車載型 S バンド境界層レーダーで大気境界層内の気流と乱れの強さを測定した。なお、観測の詳細は堀口ら（2002）が報告している。

観測期間のうち、接地層における安定度が中立に近い状態であった日について解析を行っている。

2.2 信楽における観測

京大生生存圏研究所（観測当時は宙空電波科学研究所）信楽 MU 観測所（滋賀県甲賀市信楽町）は、丘陵地帯に位置していて周囲の土地の起伏が大き

いが、大気境界層全層にわたる風の観測が可能となる測器が配置されている。この場所で2000年10月に行った観測の結果については堀口ら(2002)が報告しているが、その解析例は、風速が弱く、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。

今回の解析で扱う観測は、2001年12月から2002年3月にかけて行ったものであり、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)で地表近くの気流と接地層の安定度を測定し、車載型ドップラーソダと宙空電波科学研究センターのLバンド下部対流圏レーダーで大気境界層における気流と乱れの強さについて測定した。なお、その詳細は堀口ら(2004)が報告している。

この場所についても、観測期間のうち接地層における安定度が中立に近い状態であった日について解析を行っている。

3. 大気境界層乱流の構造についての解析

3.1 着目する乱流構造のスケール

今回の観測データの解析においては、時間スケール200秒程度の比較的大きな乱流構造に特に着目している。これは、そのようなスケールの構造が観測で顕著に見られるからである。また、測定データの時間間隔が細かく(0.1秒)測定精度も高い地表近くに設置されている風速計を基準にして解析することが多いが、上空の風速を測定するドップラーソダではデータの時間間隔が20~30秒であり、地表近くの風速と上空(高度40~350m程度を観測)での風速がある程度関連した時間変化を示すように見えるのがこの程度以上の大きさの風速変動だからでもある。なお、地表近くでの超音波風速温度計による風速変動のスペクトルピークは平均流方向の風速成分に対して周期100秒程度に位置しているの、ややこれよりも大きいスケールの構造を見ることになる。

上記の時間スケールを水平方向の平均風速を用いて空間スケールへ変換することを考えると1000m程度に対応している。これは、今回解析を行った観測例の時に考えられた大気境界層の厚さと同程度のスケールであり、従って、大気境界層全体の乱れの形成と運動量輸送に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

3.2 強風域の構造と運動量輸送への寄与

まず、潮岬での1998年12月8日11時10分から14時48分にかけての時間帯における観測について解析結果を示す。この時、大気境界層の厚さはSバンド境界

層レーダーによるエコー強度の測定からおおよそ1100m程度であると見積られる。

ドップラーソ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域・弱風域の構造が見られる(堀口ら, 2002)が、その中でも顕著に現れる前節で述べたような比較的大きな時間スケールを持った強風域の構造に着目して解析する。そして、強風域の空間的構造と、この構造による運動量輸送への寄与について調べる。そのために超音波風速温度計とドップラーソダによる観測データを解析して、強風域の構造を抽出する。

対象とする全時間帯はパート1~4に分けて解析する。水平面内平均流方向を超音波風速温度計による風速データから決め、超音波風速温度計とドップラーソダ各高度の平均流方向風速成分(u)について平均からの偏差を標準偏差で規格化してウェーブレット変換を施し、時間スケール240秒のウェーブレット係数が0.5以上の時間帯を強風域として抽出する(Fig. 1)。なお、ウェーブレットとしては“Mexican hat”関数を使用し(堀口ら, 2002)、時間スケールを比較的大きく取ることによって、そのようなスケールの風速構造を抽出している。また、しきい値は任意に決めたものであるが、結果として特徴的な強風域を抽出できていると考えられる。パート1~4に分けて解析した結果を接続して、ドップラーソダのデータに対するウェーブレット係数から決めた強風域(上図)と超音波風速温度計のデータに対するウェーブレット係数(下図)から決めた強風域(ドップラーソダのデータによる時間高度断面図の下方に太線で示す)の両方を示す。

平均流方向風速成分と鉛直方向風速成分(w)について、各高度における各パートでの平均値からの偏差を u' 、 w' とする。 $u'w'$ 値の平均は乱流変動から生じる応力(レイノルズ応力)に対応しており、運動量の鉛直輸送量(フラックス)を示している。なお、平均的に風速は上空の方が強く、運動量は下方へと輸送されている。

ウェーブレット係数がしきい値以上となる強風域での $u'w'$ 値の平均を全時間帯での値と比較したのがFig. 2である。超音波風速温度計平均流方向風速成分とドップラーソダ各高度での平均流方向風速成分に対するウェーブレット係数の二通りを基準にしている。この日の観測では高度200mより高いところについて鉛直方向風速成分の測定値に異常が多く見られたので、高度200mまでしか解析できていない。図を見ると、高さによってその程度は異なるが、ウェーブレット係数がしきい値以上となる強風域では運動量輸送が2倍程度まで大きくなっていることが分かる。

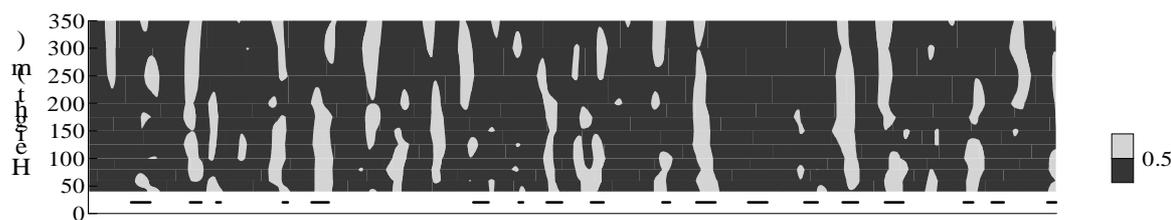
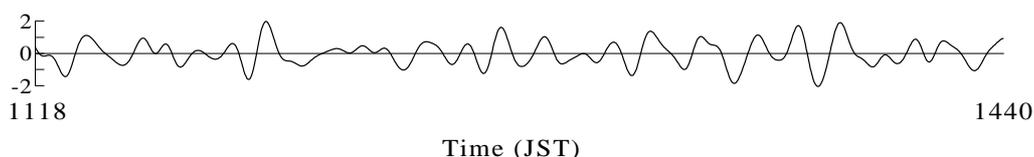
Doppler Sodar - Normalized u Sonic Anemometer - Normalized u 

Fig. 1 Wavelet coefficients for the u component of velocity measured by the Doppler sodar (upper figure) and the sonic anemometer (lower figure) at Shionomisaki. Bold bars in the upper figure show the duration when the wavelet coefficient for the sonic anemometer is larger than the threshold value (0.5).

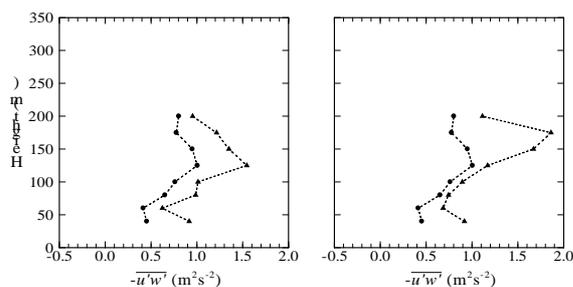


Fig. 2 Vertical profiles of mean $u'w'$ for the period of high wind speed () and the whole area () at Shionomisaki. Wavelet coefficients for the u component of velocity by the sonic anemometer (left figure) and the Doppler sodar (right figure) are used for the threshold value.

次いで信楽での 2001 年 12 月 10 日 9 時 0 分から 12 時 38 分にかけての時間帯における観測について、潮岬におけるのと同様にパート 1 から 4 に分けてデータを解析する。大気境界層の厚さは、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。

この場所でも、ドップラーソーダによる観測で、数 10 秒から 2 分程度の時間スケールを持った強風域・弱風域の構造が見られるが(堀口ら, 2004), 潮岬の場合と同様に、観測で顕著に現れる比較的大きな時間スケールを持った強風域の構造に着目して解析する。そ

して、強風域の空間的構造と、この構造による運動量輸送への寄与を調べるために、風向風速計、ドップラーソーダ、及び下部対流圏レーダーの平均流方向風速成分に対して“Mexican hat”関数による連続ウェーブレット変換を施し、時間スケール 240 秒のウェーブレット係数が 0.5 以上の時間帯を強風域として抽出する (Fig. 3)。なお、下部対流圏レーダーで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である。そこで、地上 17m の風向風速計による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している。そして、ここでは下部対流圏レーダーにより大気境界層上部にもドップラーソーダによるのと同様な強風域の構造が観測されている。

潮岬についてと同様に、ウェーブレット係数がしきい値以上となる強風域での $u'w'$ 値の平均を全時間帯での値と比較したのが Fig. 4 である。風向風速計平均流方向風速成分とドップラーソーダ各高度での平均流方向風速成分に対するウェーブレット係数の二通りを基準にしている。結果を見ると、やはりウェーブレット係数がしきい値以上となっている強風域では運動量輸送が 2 倍程度まで大きくなっていることが分かる。

LTR - Normalized Southward Velocity

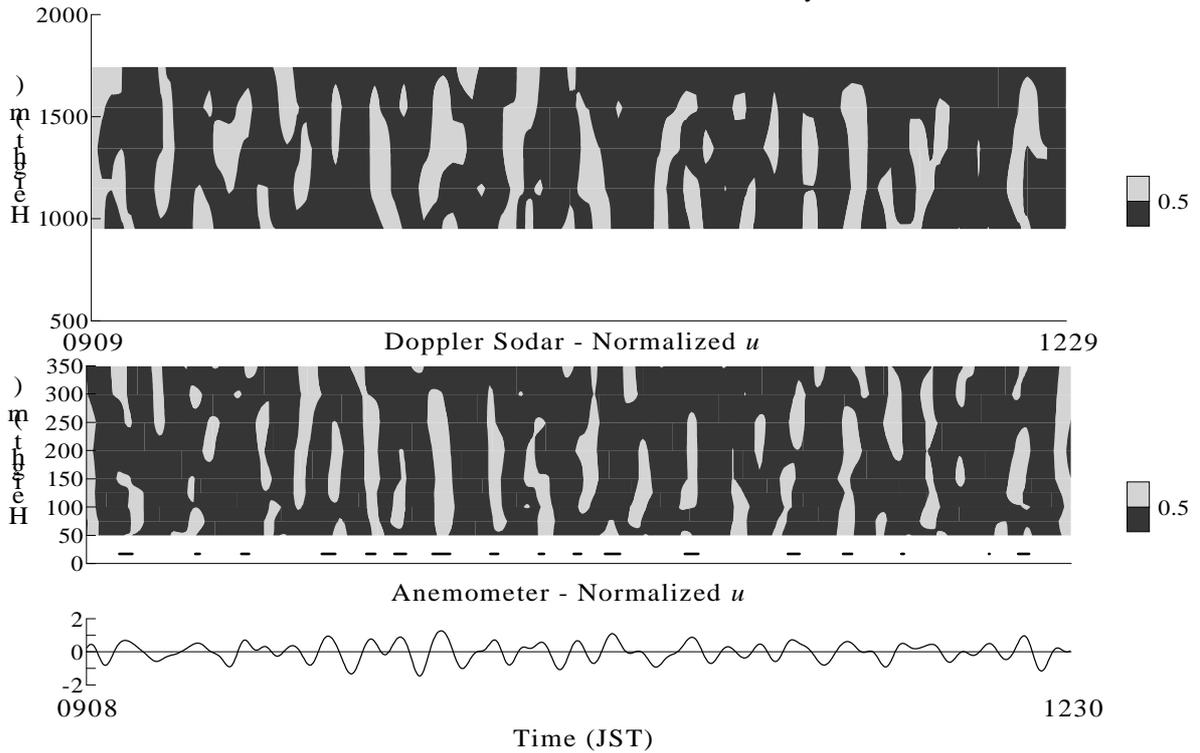


Fig. 3 Wavelet coefficients for the u component of velocity measured by the lower troposphere radar (LTR) (upper figure), the Doppler sodar (middle figure), and the anemometer with wind vane (lower figure) at Shigaraki. Bold bars in the middle figure show the duration when the wavelet coefficient for the anemometer is larger than the threshold value (0.5).

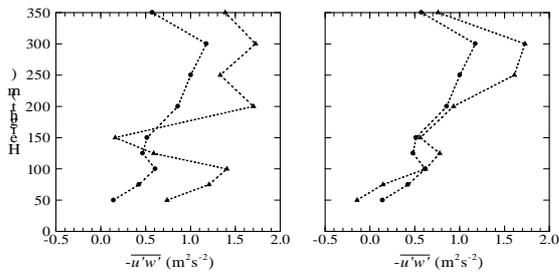


Fig. 4 Vertical profiles of mean $u'w'$ for the period of high wind speed () and the whole area () at Shigaraki. Wavelet coefficients for the u component of velocity by the anemometer with wind vane (left figure) and the Doppler sodar (right figure) are used for the threshold value.

3.3 地表近くでの運動量輸送に寄与する風速変動のスケール

大気境界層において地表へ向かっての運動量輸送にどの程度のスケールの風速変動が大きく寄与しているのかについて調べるため、超音波風速温度計による測定から、平均流方向風速成分 u とそれに鉛直断面内で直交する方向の風速成分 w 間のコスペクトルを考える。なお、観測場所の周囲の地形や建物などによる気流への影響を配慮して、ここからの超音波風速温度計データの解析での平均流方向は特に三次元的に考えたものを用いる。コスペクトルは、二つの不規則変動についてのクロススペクトルの実数成分であり、この場合は、スケールごとの $u'w'$ 値への寄与、すなわちレイノルズ応力 (運動量輸送) への寄与を示している。

Fig. 5 は、潮岬の 1998 年 12 月 8 日における各パートでコスペクトルを計算し、それを平均したものである。コスペクトルの値が負である場合が運動量の下方への輸送であり、図ではコスペクトルにマイナスを取ったものを示しているが、周波数 10^{-2}Hz (周期 100 秒) 程度を中心としてコスペクトルの強度が大きくなって

いる。これをこの時の平均風速から空間スケールに変換して考えると、運動量輸送への寄与は数 100m 程度のスケールの乱流変動によるものが大きいことが分かる。

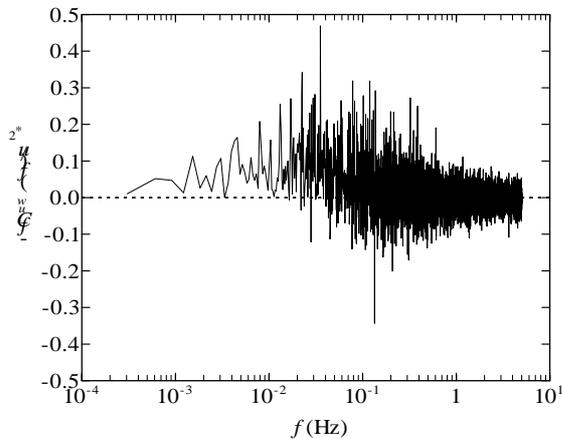


Fig. 5 Normalized cospectrum C_{uw} between u and w component of velocity at Shionomisaki. f is the frequency and u_* is the friction velocity.

またこの結果は、地表近くでの運動量輸送に大きく寄与する風速変動について、上空で現れる比較的大きな時間スケールを持った強風域の構造との関連を示唆している。

3.4 運動量輸送に寄与する乱流運動

平均流方向 (u) と鉛直方向 (w) の風速成分について、それぞれの平均値からの変動成分の正負により乱流変動を四象限に分類して考える。平均的に見て地表近くに比べて上空の方が風速は強く、運動量輸送も下向きであるが、各象限で $u'w'$ の値を考えると、その値が負である場合、上空から下方に向かっての運動量輸送に寄与することになる。それに対応する乱流運動として、 $u' < 0, w' > 0$ であるイジェクション (低速流の上昇運動) と $u' > 0, w' < 0$ であるスウィープ (高速流の下降運動) がある。ここでは、上空から下方への運動量輸送に対する両者の寄与を比較する。

Fig. 6 は、潮岬における 1998 年 12 月 8 日の観測について、ドップラーソーダによる u', w' 値を 4 象限に分類して各象限で $u'w'$ 値を積算し、それを高度 40m での全象限積算 $u'w'$ 値で規格化して運動量輸送への寄与を示したものである。また、高度 20m の位置に、超音波風速温度計による値を全象限積算 $u'w'$ 値で規格化して示した。ドップラーソーダのデータについて、スウィープによる寄与の方がやや大きく、超音波風速温度

計のデータでもわずかにスウィープによる寄与の方が大きいことが分かる。

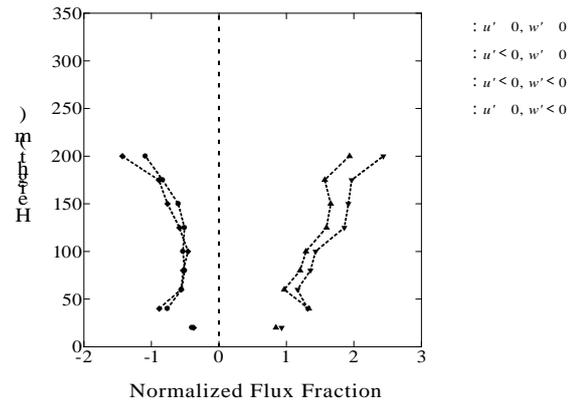


Fig. 6 Momentum flux fraction of quadrant components of velocity (u', w') normalized by the total flux at the height of 40m (Shionomisaki). The values higher than the height of 40m were measured by the Doppler sodar, and the values at lowest height were measured by the sonic anemometer.

潮岬での観測の 1998 年 12 月 8 日パート 1 について、ドップラーソーダ平均流方向風速成分についての時間高度断面図と共に、超音波風速温度計による平均流方向風速成分、及びスウィープとイジェクションによる運動量輸送への寄与の時間変化を見ると (Fig. 7)、上空の強風域 (例として破線の楕円で示す) と対応して地表近くでスウィープの乱流運動が現れていることが分かる。

一方、信楽での 2001 年 12 月 10 日における観測からは、イジェクションとスウィープによる寄与はあまり変わらないという結果が得られる (Fig. 8)。

観測によるこれらの結果は、イジェクションによる運動量輸送の方が卓越するというこれまでの数値実験 (Lin et al., 1996; 堀口ら, 2003) の結果とは異なるものであり、現実の大気境界層では、比較的大きなスケールを持った強風域の構造が運動量輸送に重要な役割を演じており、それが高速流の下降運動であるスウィープの乱流運動による寄与として現れることが示唆される。

(8 Dec. 1998)

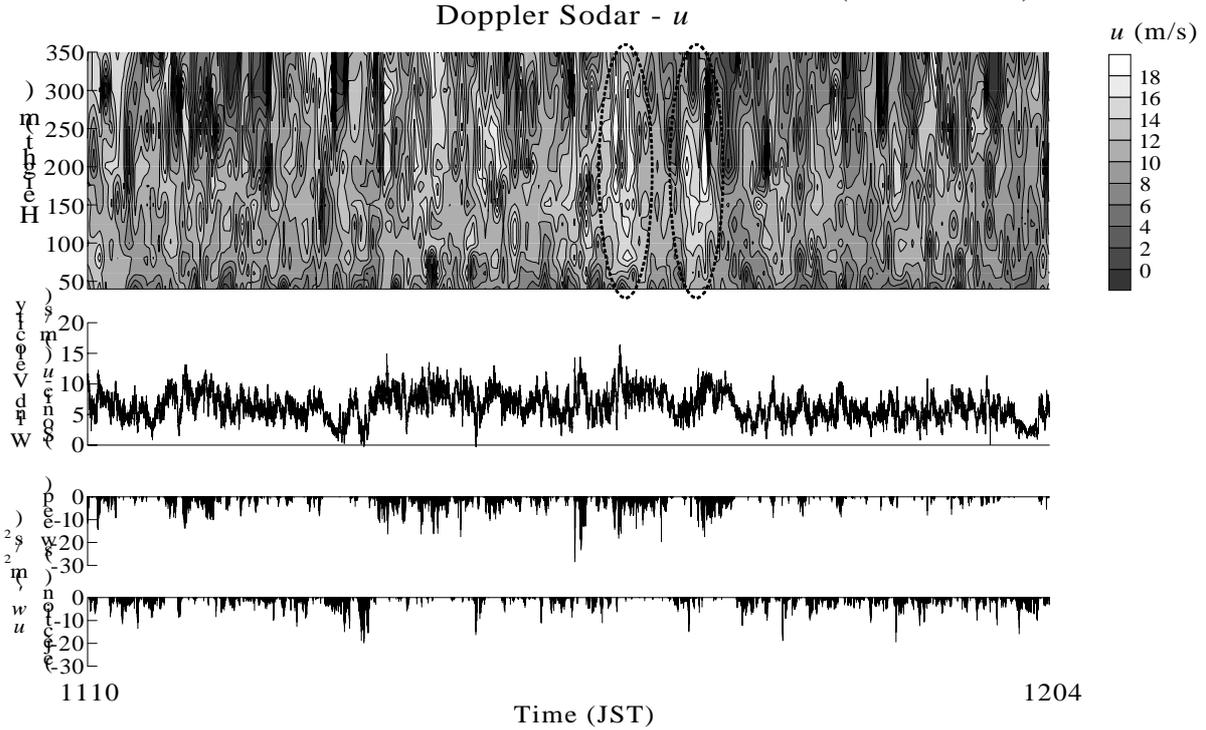


Fig. 7 Time-height cross section of the u component of velocity observed by the Doppler sodar (upper figure), the u component of velocity measured by the sonic anemometer (middle figure), and the $u'w'$ value for the ejection and sweep components (lower figures) at Shionomisaki. Ellipses using dashed line show the typical areas of high wind speed.

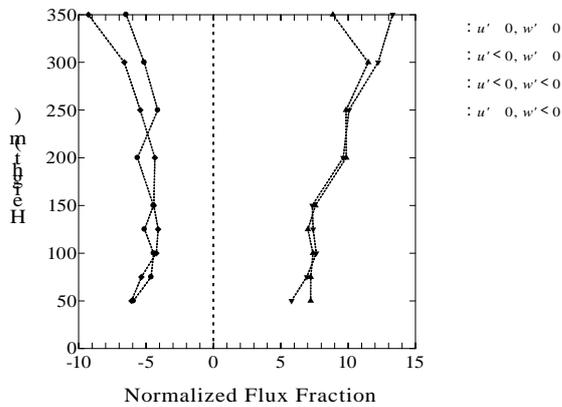


Fig. 8 Momentum flux fraction of quadrant components of velocity (u' , w') normalized by the total flux at the height of 50m (Shigaraki)

4. おわりに

潮岬風力実験所と信楽 MU 観測所において大気境界層乱流の観測を行った結果について新たな解析を行った。その結果、時間スケール 200 秒程度の比較的大きな強風域の構造による運動量輸送への寄与は平均的な値に比べて2倍程度まで大きいことが示された。また、地表近くでの運動量輸送へは周期 100 秒程度の乱流変動による寄与が大きく、イジェクション（低速流の上昇運動）とスウィープ（高速流の下降運動）による運動量輸送を比較すると、ややスウィープによる寄与が大きい場合が見られ、これらのことと強風域の構造との関連が示唆された。

以上のことは、大気境界層乱流中で組織構造の一形態として現れていると考えられる比較的大きなスケールの強風域の構造が大気境界層全体の乱流構造と乱流輸送に大きな役割を果たしていることを示している。

今後については、乱流構造の大気境界層全体にわたる空間構造とその時間変化の特徴を把握しその乱れの形成と運動量輸送に及ぼす影響を定量的に調べ、さらには乱流構造の形成と時間発展の機構を明らかにする

ため、各種条件、パラメータなどを再検討した上で、数値実験を進める予定である。

謝 辞

観測に際して、潮岬風力実験所と生存圏研究所（当時は宙空電波科学研究センター）の方々と（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、信楽における観測は、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。

参考文献

堀口光章・林 泰一・植田洋匡（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・林 泰一・植田洋匡（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.

堀口光章・林 泰一・植田洋匡（2004）：信楽における大気境界層乱流の構造の観測 京都大学防災研究所年報，第 47 号 B，pp. 417-423.

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.

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.

Structures of Turbulence in Nearly Neutral Planetary Boundary Layer - Observations at Shionomisaki and Shigaraki -

Mitsuaki Horiguchi, Taiichi Hayashi, and Hiromasa Ueda

Synopsis

Turbulent structures in the nearly neutral planetary boundary layer observed at Shionomisaki Wind Effect Laboratory and Shigaraki MU Observatory is analyzed. Structures of high wind speed with larger time scale (about 200s.) make large contribution to momentum transfer which is up to about 2 times of average values. Near the surface large contribution to momentum transfer by turbulent fluctuations with time scale of about 100s. is shown. The sweep turbulent motion (downward high speed motion) may dominate the ejection motion (upward low speed motion) for the momentum transfer. Some relation of these results to the structures of high wind speed is suggested.

Keywords: planetary boundary layer, turbulence, coherent structure, momentum transfer, Doppler sodar