

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—

Observations of the Atmospheric Boundary Layer in the Suburbs of the City —Characteristics of Turbulence in the Surface Layer—

堀口光章・辰己賢一⁽¹⁾

Mitsuaki Horiguchi and Kenichi Tatsumi⁽¹⁾

(1) 東京農工大学大学院農学研究院

(1) Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

Synopsis

Observations of the turbulence in the atmospheric surface layer have been made using sonic anemometer-thermometers on a meteorological tower (55-m tall) of the Observation and Analysis System for Local Unusual Weather in the Ujigawa Open Laboratory. This place is located in the suburbs of Kyoto and surrounded by low buildings and roads. In the winter and early spring of 2012–2013, turbulence data were measured at two levels (40 and 25 m) on the tower. For a preliminary examination, turbulence characteristics under near-neutral conditions are presented. Large-scale turbulence structures are sometimes identified from the wavelet variance spectra for the streamwise velocity components.

キーワード: 強風, 大気境界層, 接地層乱流, 運動量輸送

Keywords: strong wind, atmospheric boundary layer, surface-layer turbulence, momentum transfer

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」の一環として、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにおいて2012年12月から2013年3月の冬季から春季にかけての時期に接地層乱流の観測を行った。一般に、地表面摩擦により風が弱い地表面近くに比べ、上空での風は強く吹いている（大きな運動量を持っている）。この研究では、大きな規模を持った乱流構造や混合層の発達、降水過程などにより上空の（大きな）運動量が下方へ輸送され、地上付近で強風が起きる機構を調べることを目的としている。なお、接地層とは地表面から高さ数十メ

ートルまでの気層を指す。

また、今回の観測場所は京都市近郊に位置していて建物や道路などに囲まれており、乱流に対する地表の粗度物体の影響を調べることも研究の目的としている。

2. 観測の概要

乱流観測は、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）の気象観測鉄塔（高さ55m）2高度（40mと25m）に設置されている超音波風速温度計（カイジョー製、DAT-600）により行われた（Photo 1）。データのサンプリング周波数は10Hzで、風速3成分と温度の変動が記録された。また、

超音波風速温度計は、主風向限定型プローブ (TR-61A) を使用していて、北方向にそのプローブが向けられている。風が北方面から吹く際にプローブの支柱の影響が少なく良好なデータが得られるので、解析例としては40mでの平均風向 (30分の平均化時間で評価) が真北から東あるいは西へ60度以内である状態が継続した場合を選んでいる。

鉄塔から北方向を高さ40mと25mの観測デッキから眺めると (Photo 2), 近くは宇治川オープンラボラトリーの建物, 電車の線路, その先に建物, 道路などがあり, かなりの高さを持った粗度物体が風上方向に並んでいることが分かる。なお, 地表面の粗度物体の高さの指標となる粗度長の値は, 中立に近い観測例 (3章で示す) から平均風速についての対数則鉛直分布を仮定することにより求められるが, 0.1~1.7mという値となり, 観測例間でばらつきがある。

宇治川オープンラボラトリーでの気象観測鉄塔と露場においては, 気温, 相対湿度, 風向・風速, 気圧, 雨量なども連続的に測定しており, 以下に述べる安定度を評価する時, およびその他の気象状況の把握のために使用する。

大気境界層での乱流の条件を分類するのに重要な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) は, 地表の粗度物体による影響が比較的小さい高さ40mにおけ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。

$$z/L = -\frac{(g/T)(\overline{w'T'})_0}{u_*^3/kz} \quad (1)$$

ただし, ' は平均値からの変動成分, $\bar{\quad}$ 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), k はvon Karman定数 (=0.4), 添え字 $_0$ は地表面での値を示す。ここで, $\overline{w'T'}$ は鉛直方向への熱フラックスに相当する。また, u_* は次式(2)のように定義され, (下向き) 運動量輸送の大きさに対応し, 接地層における特徴的な速度の尺度であり摩擦速度と呼ばれる。

$$u_* = (\tau_0/\rho)^{1/2} = [-(\overline{u'w'})_0]^{1/2} \quad (2)$$

なお, τ は (鉛直方向への) 運動量フラックス, ρ は空気密度, u は平均流方向風速成分であり, $u'w'$ が負の値である時, 下向きへの運動量輸送に対応している。安定度の指標 z/L の値 (絶対値) は, 近似的に浮力による乱流生成率とシアによる乱流生成率の比に相当し, 浮力による寄与が小さい場合にはその値が0に近くなる。

今回の解析において, 水平方向の風速成分を扱う際には高さ40mにおける (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。しかし, 各種フラックスについては, 方向の取り方による影響が大きいため, (各高度で) 三次元的な平均流方向を考えて, 平均流ベクトルに直交する上向き方向へのフラックスを計算する。



Photo 1 Sonic anemometer-thermometers (denoted by the dotted red circles) on a tower in the Ujigawa Open Laboratory

(a)



(b)



Photo 2 View toward north direction from the 40-m deck (a) and 25-m deck (b) of the tower

3. 中立に近い状態での観測例

観測データは、30分間（1パートとする）ごとに乱流統計量を求め解析に使用する。ここでは、これまでの組織的な乱流構造についての研究で主に対象としてきた中立に近い状態、基準として z/L の大きさが0.2未満である条件が7パート（3時間30分）継続した観測例についての結果を示す（Table 1）。中立に近い状態とは、主に風のシアによって乱れが生成され、比較して浮力による乱れの生成（暖められた空気塊の上昇による乱れの生成など）の度合いが小さい場合であり、 z/L の値は0に近くなる。今回解析した12個の観測例では、7パートの平均として中立に近いものの、やや不安定寄りの値（ $z/L < 0$ ）を示す例が6例見られる。その他、表には平均風向の7パートでの範囲、（平均）水平風速、摩擦速度の7パートでの平均値も示す。水平風速は $3.5 \sim 6.2 \text{ m s}^{-1}$ 、摩擦速度は $0.24 \sim 0.53 \text{ m s}^{-1}$ の範囲であり、今回の観測例間で大きな違いはない。

Fig. 1は、2012年12月26日18時から21時30分におけ

る例について、その始めの30分間における平均流方向風速成分 u の時間変化である。なお、ここでの平均流方向風速成分は、高さ40mにおける（水平面内）平均流方向に取った風速成分であり、高さ25mでも同じ方向に取っている。

Fig. 1によれば、小さな規模の乱れに重なって、100～200秒程度の時間スケールを持った比較的大きな規模の風速変動（赤色点線の領域で典型的な強風域の例を示す）が現れている。またそのような風速変動は上下の観測点間で良く対応しており、鉛直方向にも大きな拡がりを持っていることが分かる。

Fig. 2に、Fig. 1と同じ時間帯での鉛直方向風速成分 w を風速成分 u に重ねて表示する。大きな規模の強風域（Fig. 1で典型的な強風域として示したもの）の前の時間に比較的大きな時間スケールを持った弱風域が存在し、そこでは上向きの鉛直風速となっている。大きな規模の（水平方向の）風速変動と関連して鉛直風速の変動が存在し、運動量輸送に寄与していることが分かる。

Table 1 Observational cases for the analysis (observed range of wind direction and average values for other parameters)

No.	Date	Time (LST)	Wind direction (deg)	Horizontal wind speed (m s^{-1})	Friction velocity u_* (m s^{-1})	z/L
1	21 Dec 2012	1930-2300	29- 42	4.5	0.33	0.05
2	22 Dec 2012	1630-2000	316-352	5.5	0.43	0.06
3	26 Dec 2012	0630-1000	302-314	6.2	0.53	-0.05
4	26 Dec 2012	1800-2130	304-323	3.5	0.38	-0.03
5	6 Jan 2013	1800-2130	323- 19	3.7	0.24	0.04
6	9 Jan 2013	1630-2000	313-336	5.0	0.42	0.07
7	17 Jan 2013	1730-2100	347- 1	3.8	0.38	-0.02
8	18 Jan 2013	0430-0800	302-308	4.7	0.46	-0.02
9	20 Jan 2013	1600-1930	337-355	4.1	0.42	-0.04
10	22 Jan 2013	1600-1930	324-345	5.2	0.44	0.02
11	26 Jan 2013	1730-2100	300-318	4.6	0.49	-0.02
12	3 Feb 2013	0130-0500	335-357	4.7	0.45	0.03

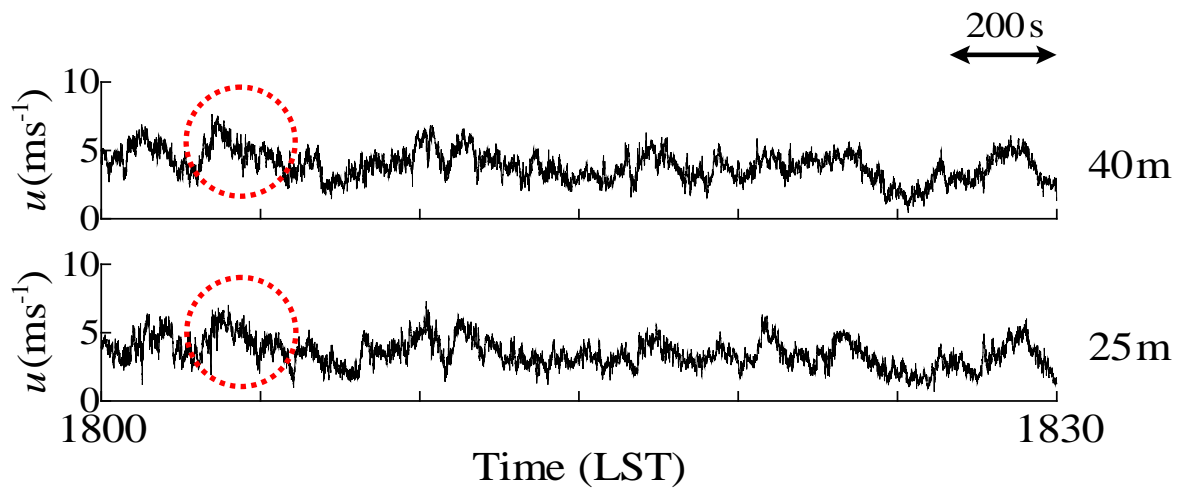


Fig. 1 Time series of streamwise velocity components (u) observed by sonic anemometer-thermometers at each level during 1800–1830 LST on December 26, 2012. The arrow denotes a time scale of 200 s and the dotted red circles denote typical large-scale regions of high-speed velocity

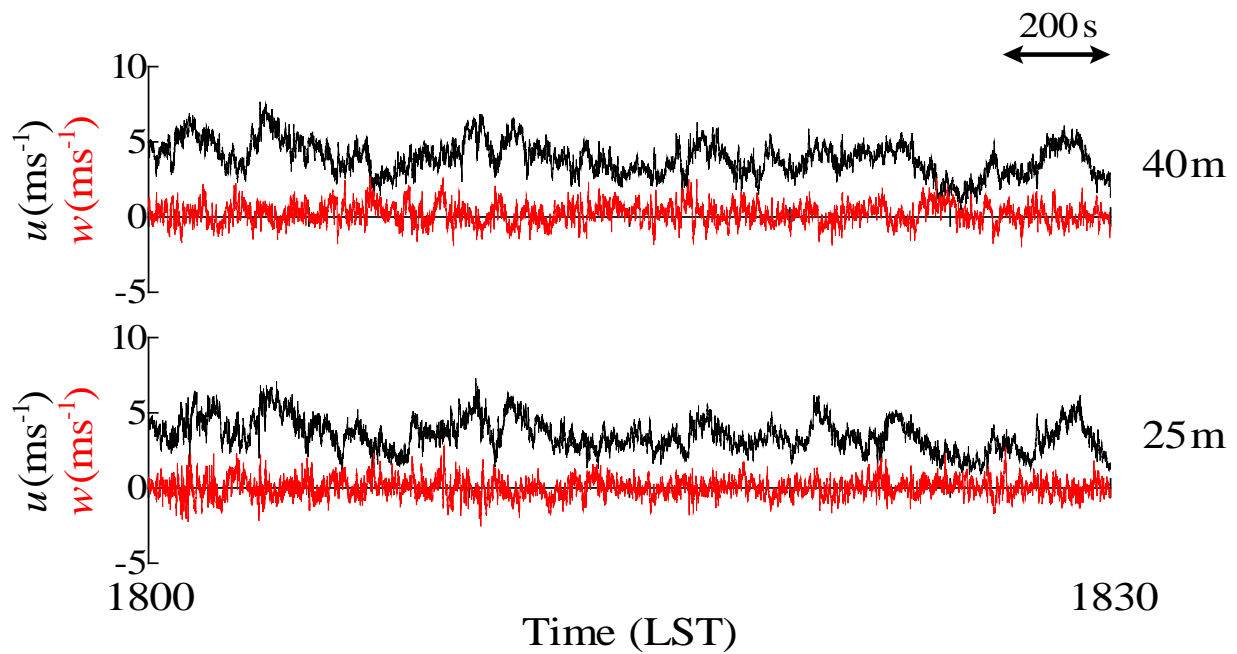


Fig. 2 Time series of streamwise (u) and vertical (w) velocity components (depicted in red color) observed by sonic anemometer-thermometers at each level during 1800–1830 LST on December 26, 2012. The arrow denotes a time scale of 200 s

4. 乱流構造の出現状況と乱流の性状の変化

不規則に現れる変動のスケール分布を調べるために Mexican Hat 関数を用いた連続ウェーブレット変換を平均流方向風速成分 u に対して行う。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(3)に示す通りである。

$$T(a, b) = \left(\frac{1}{a} \right) \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right)^* x(t) dt \quad (3)$$

ここで、 $\Psi(t)$ はマザーウェーブレットと呼ばれ、* は複素共役を示す。

今回の解析ではマザーウェーブレットとして Mexican Hat 関数を使用し、これは次式(4)で表される。

$$\Psi(t) = (1-t^2) \exp(-t^2/2) \quad (4)$$

不規則に現れる変動のスケール分布を調べるために、ウェーブレット変換によるウェーブレット分散スペクトル ($W(a)$) を作成する (Collineau and Brunet, 1993; Thomas and Foken, 2007)。その定義は次式(5)の通りである。

$$W(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |T(a, b)|^2 db \quad (5)$$

なお実際の計算では、オリジナルのデータ列をブロック平均したのに対してトランスレーションパラメータ b を変化させてウェーブレット係数を計算し、(積分ではなく) その2乗を積算した値としてウェーブレット分散を求めている。

ウェーブレット変換による解析においては、スケールパラメータ a の2倍の大きさに相当する「時間スケール」がスケール分布を調べる時に使用され、Mexican Hat 関数の場合にはその中心 ($t=0$) 前後の、値がプラスの範囲の長さに相当する。

2012年12月26日18時から21時30分における例の各高度の風速成分 u をその標準偏差で規格化し (30分ごと)、さらに上記のようにオリジナルデータを20個ずつ (2秒ごとに) ブロック平均し、これを全パート接続したデータ列に対してウェーブレット変換を行う。ここで、スケールパラメータ a の値については、 $a=1$ から 88 (時間スケールでは $2a=4$ から 352秒) までの計算を行っている。この例についてのウェーブレット分散スペクトルを調べると、100秒以上の時間

スケールを持った大きな乱流構造が顕著に存在することが確かめられる (Fig. 3)。この例で、高さ40mの風速成分 u に対するウェーブレット分散スペクトルのピーク (解析している全時間スケールでの最大) は204秒の時間スケールに位置している。なお、平均の u (3.4 m s^{-1}) の値から換算すると、およそ690mの空間スケールに対応している。

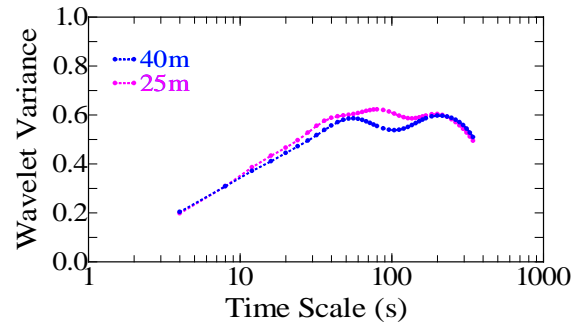


Fig. 3 Wavelet variance spectra for the u velocity component as a function of the time scale in the case 1800–2130 LST on December 26, 2012

高さ25mでの風速成分 u についてのウェーブレット分散スペクトルは、時間スケール80秒でその分散がピーク (最大) となっているが、より大きな時間スケール (196秒) でもスペクトル分布の極大を示し、これは上の高度 (40m) でのスペクトルピークに対応している。これは、より低い高度 (25m) でも大きな乱流構造が現れていることを示している。

上記のウェーブレット分散スペクトルにより解析される大きな乱流構造は、Fig. 1で見られる100~200秒程度の時間スケールを持った比較的大きな規模の風速変動に対応しているものと考えられる。

なお、フーリエ変換によるパワースペクトルでも同じように風速変動のスケール分布を調べることが出来、対応する周波数付近で大きな変動が解析される。ただし、フーリエ変換によるパワースペクトルではピークの位置が不明確で、それに対してウェーブレット分散スペクトルではピークの位置を決めやすいという特徴がある。

観測された大きな規模の乱流構造は、中立に近い状況で例えば Gao et al. (1989) により森林上で観測された構造や気象研究所気象観測鉄塔において観測された構造 (Horiguchi et al., 2012) のような下降する強風の組織的乱流構造に対応するものと考えられる。しかし、高さ40mの風速成分 u に対してウェーブレット分散を調べると、大きな時間スケールの風速変動があまり顕著ではない例も見られる。その例と

して2012年12月26日6時30分から10時にかけての観測例について、風速成分 u に対するウェーブレット分散スペクトルをFig. 4に示す。この例では、高さ40mでの風速成分 u に対して、ウェーブレット分散のピーク（最大）は40秒に位置している。

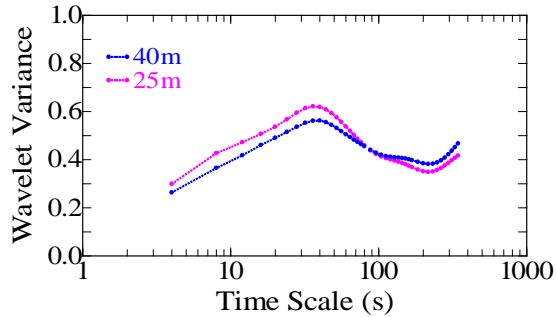


Fig. 4 Wavelet variance spectra for the u velocity component as a function of the time scale in the case 0630–1000 LST on December 26, 2012

全ての観測例について、高さ40mの風速成分 u に対するウェーブレット分散スペクトルの結果をTable 2に示す。12例のうち、3例で大きな時間スケール（100秒以上）に最大のピークが現れ、別の3例では大きな時間スケールにおいて（分散の値は調べた時間スケール内で最大ではないが）スペクトル分布の極大となっている（表中に色を付けて最大あるいは極大となる例を示す）。

上下（高さ40, 25m）の平均流方向風速成分についてその変動の相関を調べると、相関係数が0.7以上の大きな値を示す場合（表中に色を付けて示す）は、大きな時間スケール（100秒以上）の乱流構造が見られる場合に対応している。

各高度の運動量輸送については、12月26日18時からの例において高さ25mでは高さ40mでの値の68%に減少しており、乱流輸送に対する地表の粗度物体の影響が示唆される。全部の例について見てみると、12例中9例で高さ25mでの運動量輸送が高さ40mでの値より小さくなっている。

Table 2 Evaluated values of characteristics for the observational cases

No.	Date	Time (LST)	z/L	Time scale of the peak in the wavelet variance spectrum (s)		Correlation coefficient (u , 25–40m)	Imbalance in sweeps and ejections (40m)
				Global maximum	Local maximum		
1	21 Dec 2012	1930–2300	0.05	64		0.57	-0.20
2	22 Dec 2012	1630–2000	0.06	–	36	0.64	0.08
3	26 Dec 2012	0630–1000	-0.05	40		0.59	-0.15
4	26 Dec 2012	1800–2130	-0.03	204	56	0.62	-0.02
5	6 Jan 2013	1800–2130	0.04	84		0.62	-0.08
6	9 Jan 2013	1630–2000	0.07	32	128	0.50	-0.01
7	17 Jan 2013	1730–2100	-0.02	228		0.70	0.05
8	18 Jan 2013	0430–0800	-0.02	28	60 292	0.58	0.03
9	20 Jan 2013	1600–1930	-0.04	–	164	0.69	-0.06
10	22 Jan 2013	1600–1930	0.02	80		0.64	0.04
11	26 Jan 2013	1730–2100	-0.02	100		0.71	0.10
12	3 Feb 2013	0130–0500	0.03	–	64	0.68	0.03

最後に、乱流運動を u と w の変動成分の正負により四象限に分けた時の各象限での運動による（下方への）運動量輸送への寄与について、第2象限のイジェクション ($u' < 0, w' \geq 0$, 低速流の上昇運動) と第4象限のスweep ($u' \geq 0, w' < 0$, 高速流の下降運動) を比較する。これらの象限では $u'w'$ が負の値であり、下向きに運動量が輸送される。Table 2 では、高さ 40m でのスweepとイジェクションによる運動量輸送への寄与の違いを次式(6)による値 (imbalance in sweeps and ejections) で評価している。

$$\Delta S_0 = \frac{\overline{u'w'_4} - \overline{u'w'_2}}{\overline{u'w'}} \quad (6)$$

上式の値 (ΔS_0) は、スweepとイジェクションによる運動量輸送の差を全体の運動量フラックス ($\overline{u'w'}$) で規格化しており、スweepとイジェクションによる運動量輸送への寄与の違いを各例の間で比較するのに適している。

12例の中には、スweepによる運動量輸送への寄与の方が大きい例が見られる（表中に色を付けて示す）。一般に、上空ではイジェクションによる寄与の方が大きく、地表面に近くなるとスweepによる寄与が大きくなることが示されている（例えば Drobinski et al., 2004）。今回の例に関しては、運動量輸送に対するスweepとイジェクションによる寄与の違い、また乱流運動全般について、大きな規模の乱流構造の影響に加えて地表の粗度物体による影響も考えられる。

5. おわりに

今回の観測場所のように比較的高い粗度物体に囲まれた都市近郊の接地層においても、中立に近い状態で、大きな規模の乱流構造（組織的乱流構造）が顕著に現れる場合があることが確かめられた。

今後は、中立に近い状況以外の観測例も含めて、組織的な乱流構造による地上付近での強風の出現、その他乱流特性への影響などについて調べていく予定である。また、より上空の風を測定できる観測機器を使用することや気象データの解析などにより、地上付近での強風がもたらされる状況について解析を行う予定である。

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とそのための施設の維持などについては、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。

参考文献

- 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.
- Drobinski, P., Carlotti, P., Newsom, R.K., Banta, R.M., Foster, R.C. and Redelsperger, J.-L. (2004): The structure of the near-neutral atmospheric surface layer, *Jour. of Atmos. Sci.*, Vol. 61, pp. 699-714.
- 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.
- 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.

(論文受理日：2013年6月10日)