

## 低層ジェットを伴う安定境界層に発生する間欠的な乱流バースト

大屋, 裕二  
九州大学応用力学研究所

中村, 麗奈  
オレゴン州立大学

内田, 孝紀  
九州大学応用力学研究所

杉谷, 賢一郎  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/26802>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 129, pp.113-122, 2005-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

# 低層ジェットを伴う安定境界層に発生する 間欠的な乱流バースト

大屋裕二<sup>\*1</sup>, Reina Nakamura<sup>\*2</sup>, 内田孝紀<sup>\*1</sup>, 杉谷賢一郎<sup>\*1</sup>

(2005年7月29日受理)

## Intermittent Bursting of Turbulence in a Stable Boundary Layer with Low-Level Jet

Yuji OHYA, Reina NAKAMURA, Takanori UCHIDA and Ken-ichiro SUGITANI

E-mail of corresponding author: [ohya@riam.kyushu-u.ac.jp](mailto:ohya@riam.kyushu-u.ac.jp)

### Abstract

The atmospheric stable boundary layers (SBL) with a low-level jet are simulated experimentally using a thermally stratified wind tunnel. The turbulence structure and flow characteristics of those SBLs are investigated by simultaneous measurement of velocity and temperature fluctuations and by flow visualization. Attention is focused on the effect of strong wind shear due to low-level jet on stratified boundary layers with strong stability. Occasional bursting of turbulence in the lower portion of the boundary layer can be observed in the SBL with strong stability.

**Key words** : *Atmospheric Boundary Layer, Stable Stratification, Wind Tunnel Experiment, Low-Level Jet, Turbulence Bursting*

## 1. はじめに

大気境界層は地表面から機械的擾乱や熱的擾乱を直接受けるため複雑な成層乱流場となっている。したがって大気境界層内での乱流特性は、常に風のシアと浮力の両方の影響を受ける。大気境界層に現れる成層流のうち、弱く間欠的な乱れを伴う夜間の安定境界層 (Stable Boundary Layer, SBL と称する) に関しては流れの構造、乱流輸送特性など未解明の部分が多く、その力学モデルは確立していない<sup>1, 2)</sup>。我々は温度成層風洞<sup>3)</sup>を用いて様々な鉛直温度分布を有するSBLのシミュレーションを行い、その境界層構造、乱流輸送特性に関して興味深い知見を得てきた<sup>5-7)</sup>。これらのSBLの鉛直速度分布は典型的な乱流境界層の速度分布である。しかし、実際の大気中で夜間に現れるSBLの観測例では、その速度分布に低層ジェットを伴う場合 (Fig. 1 参照) が非常に多い。そこで本実験では安定成層して発達する乱流境界層の途中に上下に非一様な抵抗力を設け、低層部で風速が極大となるようなSBLをシミュレートした。この場合、一般

のSBLに比べ強い速度シアが測定部床面近くに形成される。その強い速度シアがSBLの乱流特性にどのような影響を与えるか調べた。その結果、間欠的な乱流のバーストが発生するなど興味深い知見を得たのでここに報告する。

## 2. 風洞実験法

### 2.1 温度成層風洞

実験風洞は九州大学応用力学研究所の温度成層風洞<sup>3)</sup>を用いた。本風洞は吸込み式で測定部は幅1.5m×高さ1.2m×長さ13.5mを有する。様々な温度成層流を測定部内に再現するために気流加熱装置と測定部床面加熱冷却装置の二つの独立した気流温度制御装置を装備している。気流加熱装置は測定部のすぐ上流部に設置され、その内部は高さ3cm間隔の水平仕切り板で上下40層に分割されている。各層における気流温度は2本の棒ヒーターおよび下流の白金測温体を用いてPID制御でフィードバックコントロールが可能である。これにより様々な鉛直温度分布を精度良く生成できる。気流加熱装置の下流にはハニカム及び整流用金網が2枚設置され、低乱の

\*1 九州大学応用力学研究所

\*2 Oregon State University, 現在、森林総合研究所

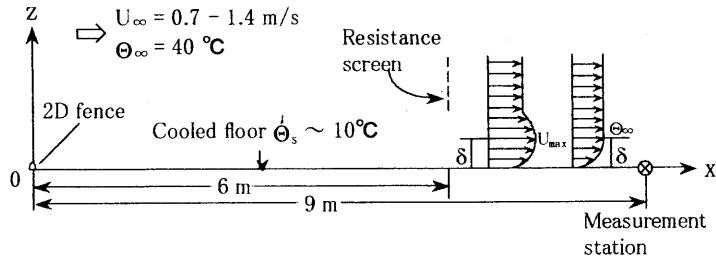


Fig.1. Experimental arrangement for SBL with low-level jet

	S1	S2
$U_{max}$ (m/s)	1.51	1.18
$Re_\delta$	16100	12600
$Ri_\delta$	0.074	0.13
$\delta$ (m)	0.16	0.16
$\Theta_\infty$ (°C)	39.3	39.2
$\Theta_s$ (°C)	11.4	10.8
$\Delta \Theta$ (°C)	27.9	28.4
$\Theta_0$ (°C)	30.4	27.7
Symbol	○	□

Table1. Experimental data

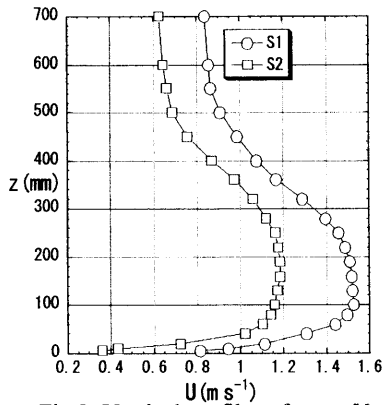


Fig.2. Vertical profiles of mean U-velocity

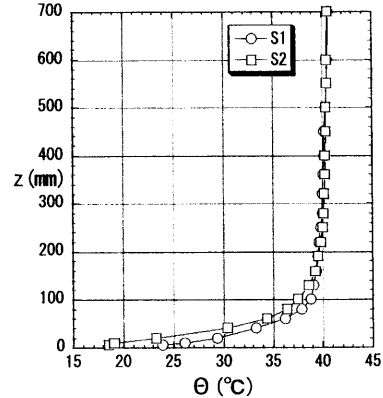


Fig.3. Vertical profiles of mean temperature  $\Theta$

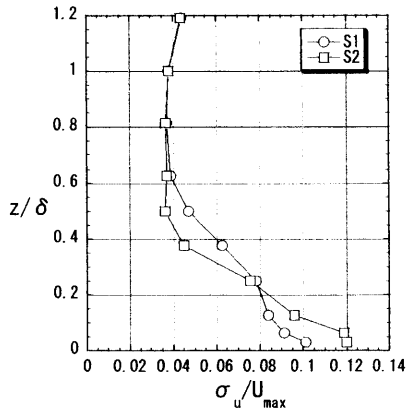


Fig.4. Vertical profiles of u-velocity fluctuation

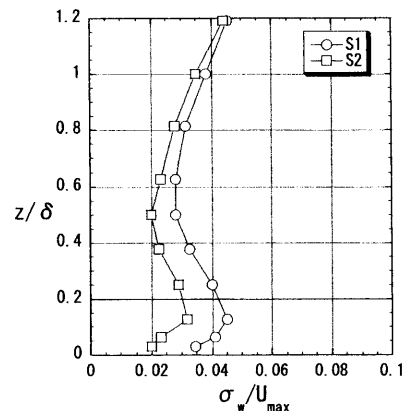


Fig.5. Vertical profiles of w-velocity fluctuation

気流（風速  $1 \text{ ms}^{-1}$  時、主流方向の乱れ強さは 0.4% 程度）が供給される。測定部の床面には幅が 1.5m、長さ 1m の単位パネルを 10 枚敷き詰めており、そこへ冷水あるいは温水を供給することによって  $4\text{--}80^\circ\text{C}$  の表面温度を各単位パネルで独立に制御することが可能である。パネル上部は厚さ 2.5cm のアルミ板が置かれ、単位パネル内で一様な温度が得られるようになっている。測定部内は二次流の発生を避け安定で一様な温度成層流が生成されるように 2 重壁構造としている。

## 2.2 実験方法

安定境界層 (SBL) を生成するために流入気流を温度  $\Theta = 40^\circ\text{C}$  程度に加熱し、床面温度を  $\Theta_s = 10^\circ\text{C}$  前後に冷却した。測定部入口 ( $x=0$ ) に乱流促進体として 5cm 高さのフェンスを置き厚い乱流境界層を生成している。低層ジェットを模擬するために  $x=6\text{m}$  の位置に、床面上の高さ 40cm より上方に抵抗網を設置し、上空の風速を減速させることで低層部に風速の極大部を生成した。乱流特性の計測はそれより 3m 下流の  $x=9\text{m}$  の位置で行った。Fig. 1 に本実験の概略図を示す。Table 1 に示すように実験は安定成層流 2 ケース (S1, S2) について行い、基準長さを風速最大値付近の高さ  $\delta$  とし、そこでの風速  $U_{\max}$ 、温度  $\Theta_\infty$  を用いて、レイノルズ数  $Re_\delta$ 、バルクリチャードソン数  $Ri_\delta (= (g/\Theta_s) \cdot (\Theta_\infty - \Theta_s) \delta / U_{\max}^2)$  を定義する。ここで  $\Theta_s$  は境界層高さ  $\delta$  の範囲における平均温度である。

## 2.3 流れの計測法と可視化

速度の測定には x 型の熱線プローブ (Dantec 55P61) と熱線流速計 (Dantec 56C17) を使用し、温度の測定には冷線プローブ (Dantec 55P05) と抵抗温度計 (Dantec 55M20) を用いた。また、気流速度のモニターや較正に必要な速度の基準値の測定には超音波流速計 (Kaijo DA-600) を用い、温度の基準値の測定、気流温度および床面温度のモニターには CA (クロメル-アルメル) 熱電対温度計を用いた。熱線プローブは風速だけでなく温度に対しても応答性があるため、正しい速度変動を評価するためには温度変動による寄与分を正確に補償しなくてはならない。本実験では以下に示す較正式に基づいて速度を評価した。

$$E^2 = (A+B \cdot U_{\text{eff}}^m) (\Theta_w - \Theta) \quad ,$$

$$\text{ただし、} U_{\text{eff}} = U (\cos^2 \phi + k^2 \sin^2 \phi)^{0.5}$$

ここで  $E$  は熱線の出力電圧、 $\Theta_w$  は熱線温度、 $\Theta$  は気流温度、 $k$  は熱線の yaw 係数である。A, B は  $\Theta$  の一次関数、 $m$  は 0.5 あるいは  $\Theta$  の関数としている。較正は温度成層風洞用に開発した較正装置 (Ohya and Fukamachi, 1997<sup>1)</sup>) を用いた。この装置は較正用の気流速度、気流温度を容易に設定でき、較正風速は耐熱センサーを装着

した超音波流速計を用いて気流温度に依存せず精度良く計測できる。乱流諸量の鉛直分布はコンピューターと連動したトラバース装置を用いて測定した。得られたデータは 200Hz のローパスフィルターを通した後、500Hz のサンプリング周波数で 12 ビットの A/D 変換を行い、コンピューターにより統計解析した。各測定点で速度、温度のデータ数はそれぞれ 50000 個で約 100 秒間の計測時間である。

流れの可視化はスモークワイヤー法で行った。床面に平行に高さを変えて配線された 13 本のスモークワイヤーを測定部入口から  $x=8\text{m}$  の断面位置に固定した。照明装置としては風洞の上部に固定された 4 台の 1kW プロジェクターを用いた。また、カメラには焦点距離が 24mm、絞り 2 の広角レンズを用い、露出時間は 1/125 秒で撮影を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 乱流特性値の鉛直分布

時間平均の風速、温度分布を Fig. 2, 3 に示す。ケース S1 と S2 では一般的な低層ジェットを伴う SBL 観測例<sup>1, 2)</sup>に近い風速分布を呈している。床面近くでは強い速度シアになっていることに注目すべきである。平均温度分布もケース S1, S2 は典型的な SBL の温度分布である。時間平均の速度変動強さおよび温度変動強さ、各種フラックスに対し、最大風速  $U_{\max}$  および温度差  $\Delta \Theta (= \Theta_\infty - \Theta_s)$  を用いて正規化した。Figs. 4-6 には  $u$ ,  $w$  速度変動強さと温度変動強さを示す。Fig. 4 のケース S2 の  $u$  速度変動は弱安定のケース S1 の値とほぼ同程度の変動強さを示している。 $w$  速度変動および温度変動は弱安定ケースの S1 がやや大きな変動強さを示している。Figs. 7-9 には運動量フラックスと熱フラックスの鉛直分布を示す。Figs. 7, 8 の運動量フラックス  $\overline{uw}$  および鉛直熱フラックス  $\overline{w\theta}$  は弱安定ケース S1 の方が境界層低層部で大きな値を示すが、Fig. 9 における水平熱フラックス  $\overline{u\theta}$  はほぼ同等の分布を示している。

### 3.2 間欠的な乱流バーストの発生

#### 3.2.1 速度変動の時系列

Fig. 10 に高さ  $z=20\text{mm}$  における  $w$  変動の時系列をケース S1, S2 の代表例について示す。弱安定のケース S1 では常に乱流状態である。注目すべきは、より安定度の高いケース S2 における  $w$  変動である。間欠的に乱流状態となるバースト現象が起こっている様子が分かる。これ以降はケース S2 の乱流バーストに注目して議論を進める。Figs. 11-13 にはケース S2 について  $w$  速度変動、 $u$  速度変動、温度変動  $\theta$  の代表的な時系列を高さ  $z=5\text{--}60\text{mm}$  の範囲で並べている。Fig. 11 の  $w$  変動時系列

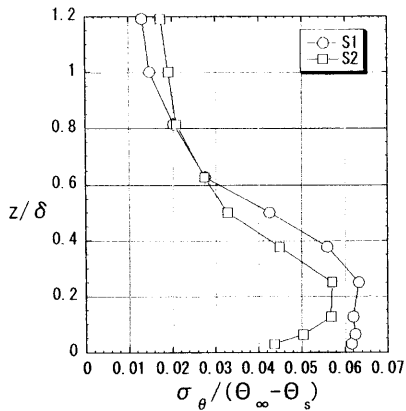
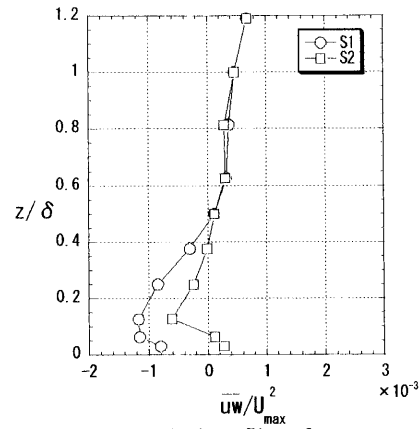
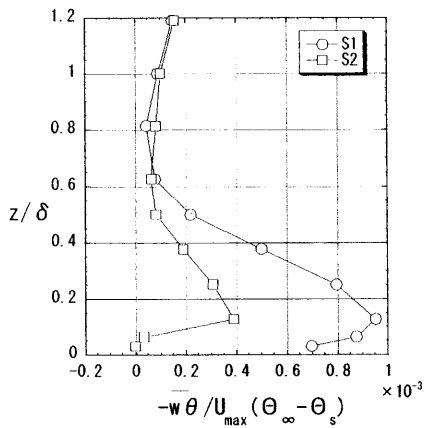
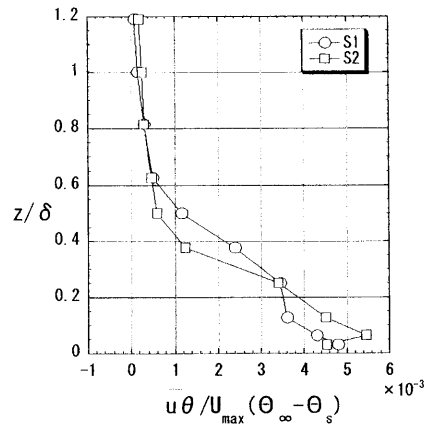
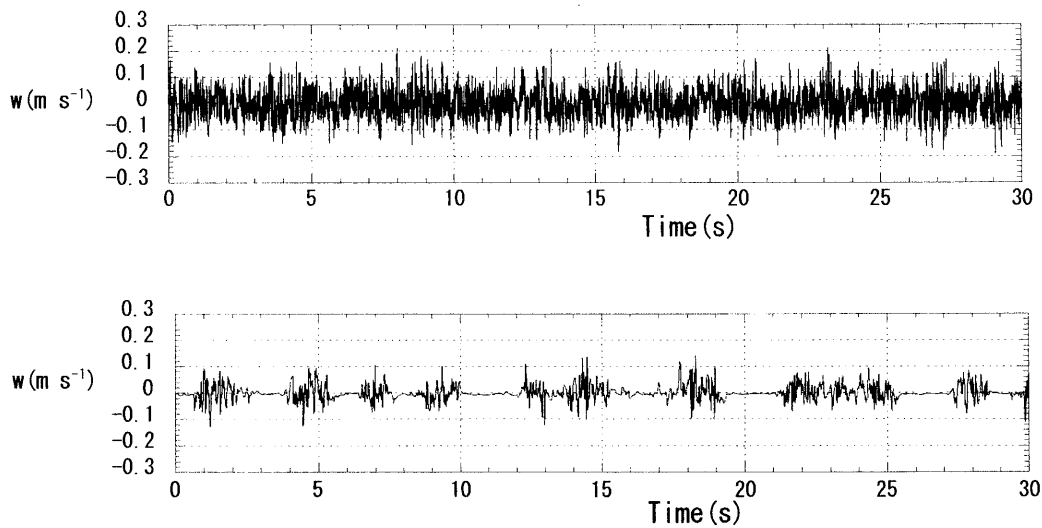


Fig. 6. Vertical profiles of temperature fluctuation

Fig. 7. Vertical profiles of momentum flux  $\overline{uw}$ Fig. 8. Vertical profiles of heat flux  $\overline{w\theta}$ Fig. 9. Vertical profiles of heat flux  $\overline{u\theta}$ Fig. 10. Time histories of  $w$ -velocity fluctuation at  $z=20\text{mm}$  (upper, Case S1; lower, Case S2)

で気づくことは、バースト変動の振幅が大きく顕著に現れているのは  $z=20\text{--}40\text{mm}$  の高さ範囲である。それより上下の高さ  $z$  ではバーストの変動は小さい。Fig. 13 の温度変動時系列においても同じことが言える。Fig. 12 の  $u$  速度変動, Fig. 13 の温度変動において特徴的な傾向が見られる。すなわち、高さ  $z=5\text{--}10\text{mm}$  の時系列に注目すると、乱流バーストの直前では  $u$  速度、温度は低下しており、バーストの直後では高速度、高温度となっている。一方、高さ  $z=30\text{--}40\text{mm}$  ではバーストが生じているとき、 $u$  速度は低速化し、温度も低温化している。以上のことから次のことが推測できる。 $z=20\text{--}30\text{mm}$  付近で生じたバーストは上方へ伝わって、低速、低温塊をもたらし、下方に伝わって高速、高温塊をもたらす。すなわち、乱流バーストは地面上で発生しているのではなく、地面上空の空間で発生しているという大変興味深いことが言える。

Fig. 11-13 に示したケース S2 の速度変動、温度変動の時系列において、特に高さ範囲  $z=0\text{--}30\text{mm}$  では、乱流バーストが生じているとき以外の時間帯では、変動はほとんどなく非乱流状態である。これらの時間帯では、Figs. 4-6 で示した速度乱れ強さおよび温度変動強さは、高さ  $z=0\text{--}30\text{mm}$ 、すなわち  $z/\delta=0\text{--}0.2$  の範囲できわめて小さくゼロの状態に近づく。このような鉛直分布プロファイルは過去の実験<sup>5,6)</sup>から分かるように強安定の SBL 流れと言えらる。すなわち、ケース S2 の場合、基本的には強安定 SBL でこれに間欠的に乱流バーストが生じている状況と言えらる。

### 3.2.2 2点の高さにおける速度、温度変動の同時計測

乱流バーストの発生メカニズム、規模、挙動をより詳しく捉えるために、ケース S2 に対して、 $x$ 、 $y$  方向では同じ位置 ( $x=9\text{m}$ ,  $y=0\text{m}$ ) で高さ間隔を  $\Delta z=20\text{mm}$  離れた 2 組の熱線 X プローブと温度プローブで速度、温度変動を同時計測した。Fig. 14 に高さ  $z=30\text{mm}$  と  $z=10\text{mm}$  における  $w$  速度変動の同時計測例を示す。この時系列から明らかなように乱流バーストはまず上方の  $z=30\text{mm}$  の高さで先に発生し、わずかな時間遅れで下方の  $z=10\text{mm}$  の高さに伝わっている。このように強い速度シアを伴う SBL では、地面から離れた上空で突然乱流バーストが発生し、それが下方に伝わる現象が本実験で捉えられた。

### 3.3 流れの可視化

$x=8\text{m}$  の位置にスモークワイヤーを水平に配置して SBL 流れを可視化した。ケース S2 の  $x=9\text{m}$  付近の Side View を 2 例 Figs. 15a, b に示す。ともに乱流バーストが発生している瞬間を捉えている。バーストの規模は床面から最大  $z=60\text{mm}$  高さ程度で床表面近くに限定されている。ここで注目すべきは乱流バーストが最初に生じている高さである。乱流バーストを捉えている煙線は床面から高さ  $z=20\text{--}25\text{mm}$  程度にある。すなわち乱

流バーストは床面に接地して発生しているのではなく、床面から離れた上空で突然発生している。上空で発生した乱流バーストはすぐ下流で上方、下方に拡大している様子が見られる。可視化で捉えられた乱流バースト発生の高さは、Fig. 11-13 で示された速度、温度変動の時系列で乱流バースト発生が最も顕著に見られる高さに対応する。

### 3.4 乱流バーストの発生メカニズム

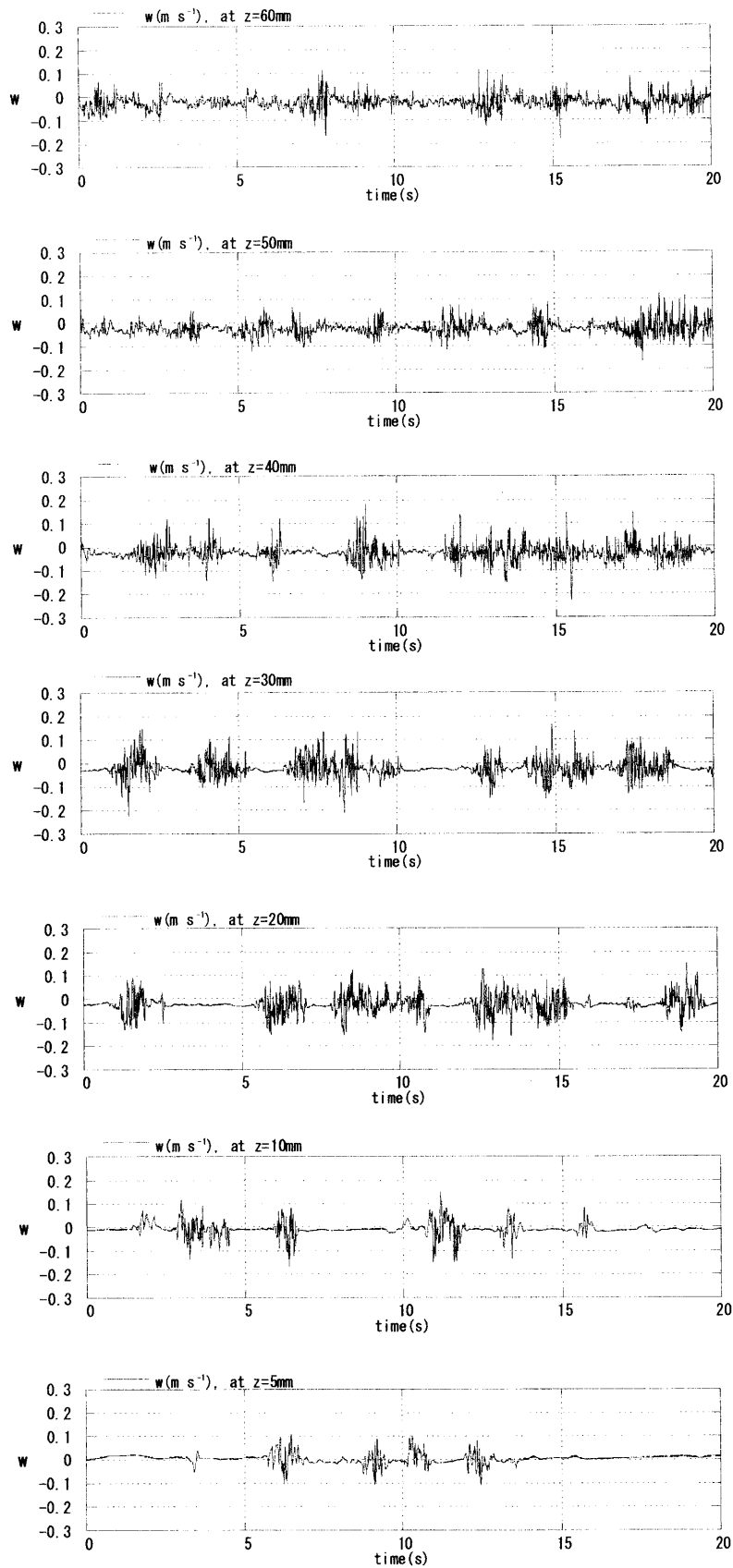
乱流バーストと局所勾配リチャードソン数との関係を調べるために、ケース S2 に対して  $\Delta z=13\text{mm}$  離れた 2 組の熱線 X プローブと温度プローブで速度、温度変動を同時計測した。Fig. 16 に示す局所リチャードソン数  $Ri$  の時系列は、高さ  $z=43\text{mm}$  と  $30\text{mm}$  の間の速度勾配、温度勾配を用いて評価された瞬間の勾配リチャードソン数である。変化をある程度滑らかに示すために 0.3 秒間の移動平均を用いて評価した。Fig. 16 には同時刻の  $w$  速度変動も合わせて示し、乱流バーストの発生とリチャードソン数の変化を対応させている。この図から分かるように乱流バーストが発生するときは低いリチャードソン数となり、バーストが止んでいるときは高いリチャードソン数となっている。

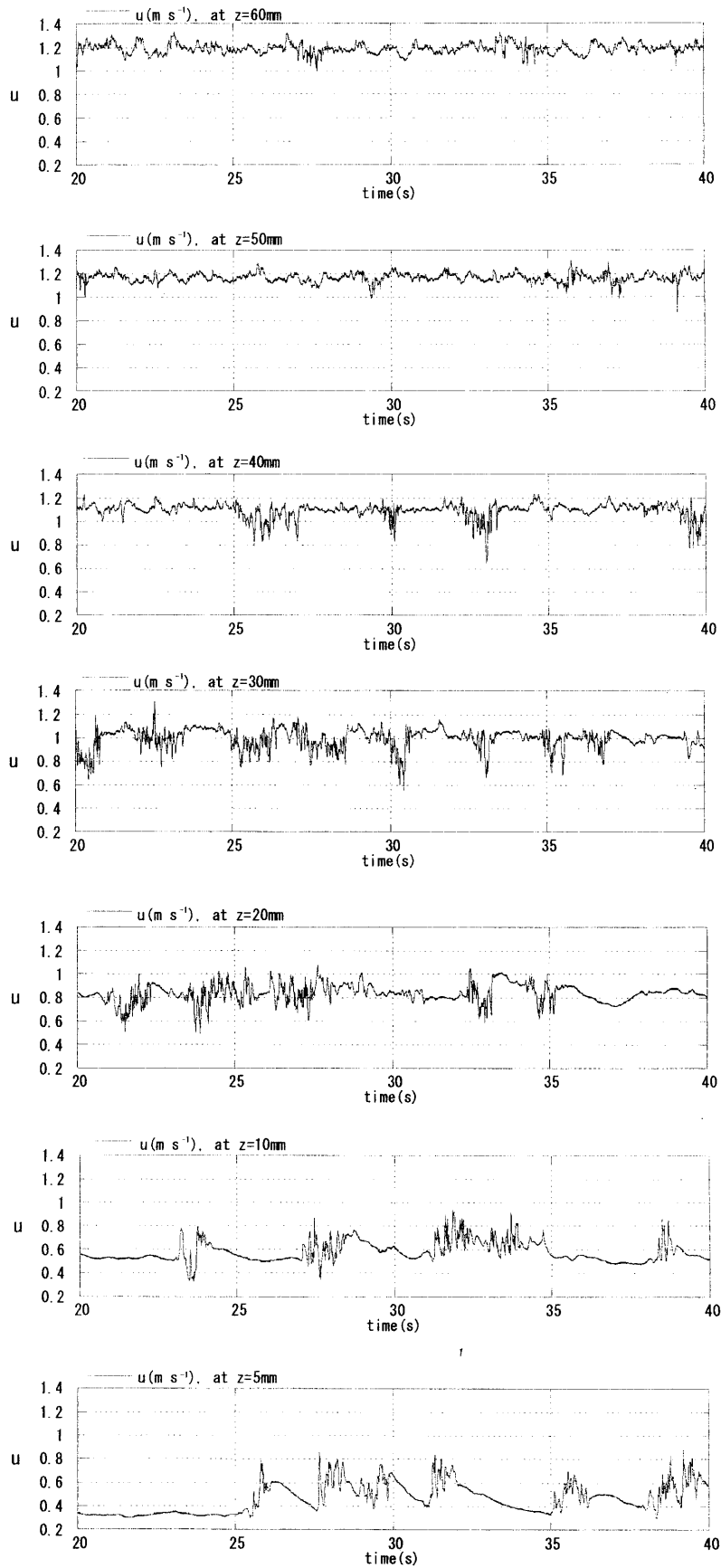
強い安定成層では乱流混合が抑制されるため、強い流速シアが形成され、下層部は速度が低下する。この時、局所的にリチャードソン数  $Ri$  が臨界リチャードソン数  $Ri_{cr}$  ( $\sim 0.25$ ) 以下となり、乱流バーストが発生する。バーストにより強い混合が起こると上層の速い流体の運動量が下層へ輸送され、下層部で速度が増加する。 $Ri$  は再び大きくなり、バーストが止んで強い安定成層が復活する。このシナリオが繰り返されて間欠的な乱流バーストの発生が生じているものと考えられる<sup>1)</sup>。

### 3.5 実際の大気安定境界層に現れる乱流バーストの関係

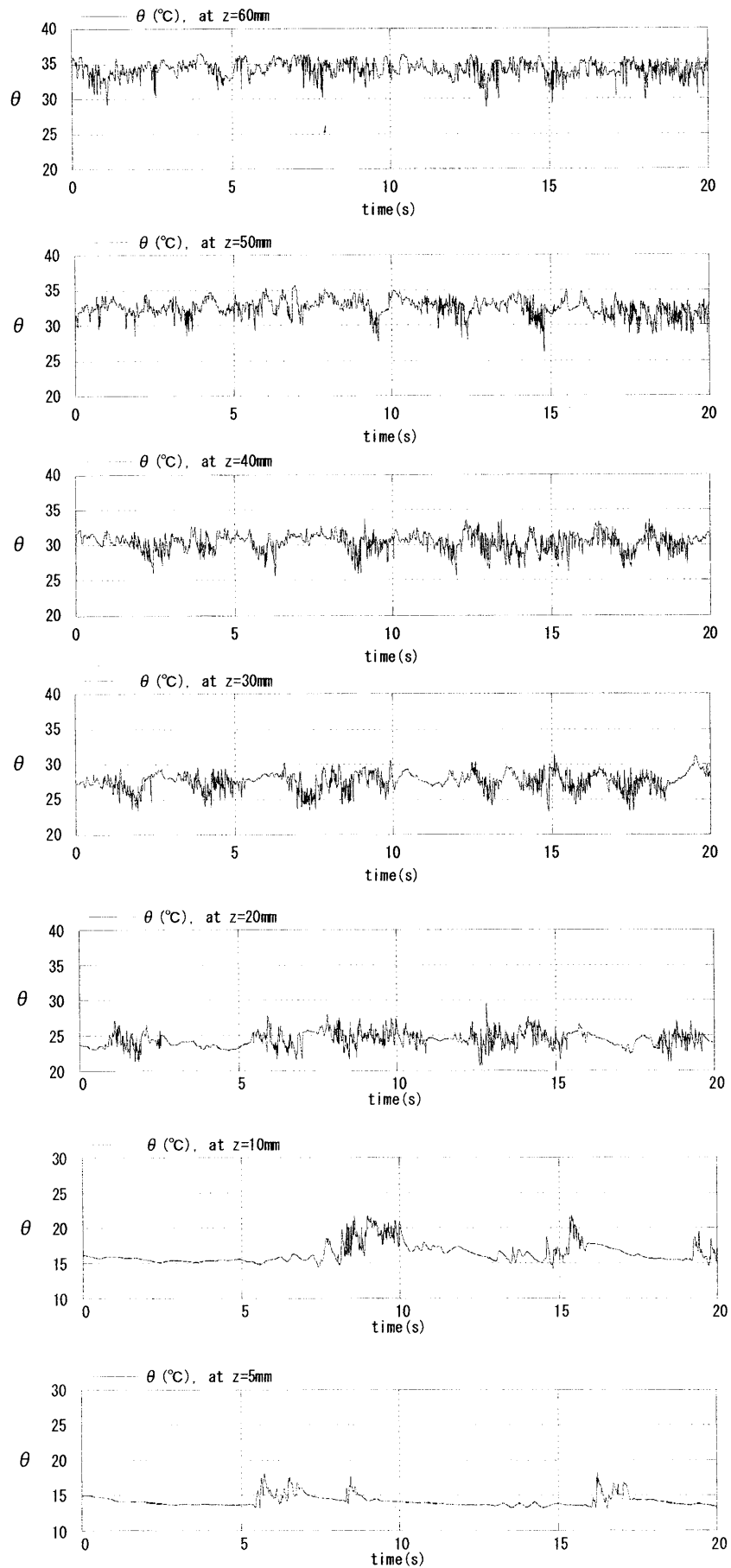
大気観測における同様な間欠的乱流の発生は Kondo et al.<sup>8)</sup>, Sun et al.<sup>9,10)</sup>, Nakamura and Mahrt<sup>11)</sup> に見られる。Kondo et al.<sup>8)</sup> は高さ  $z=4.4\text{m}$  の地表面近くで発生した間欠的乱流を報告している。 $w$  速度変動、気温変動、および熱フラックスの時系列において乱流状態、非乱流状態が繰り返して生じている。これと対応して勾配リチャードソン数の時系列も示し、乱流状態では低い  $Ri$  数、非乱流状態では高い  $Ri$  数となることを示している。この対応関係は Fig. 16 で示したバースト発生と  $Ri$  数の対応関係と同様である。

Sun et al.<sup>9,10)</sup> は CASES99 プロジェクトにおいて夜の強安定 SBL 状態中に発生した乱流バーストを報告している。密度カレントの通過により、地表面に近い大気層で風速が増加し、地面との間に強い風速シアが生じて一時的にリチャードソン数が低下し、乱流バーストが発生している。これは 60m タワーに設置された高さ  $z=1.5\text{--}55\text{m}$  の範囲で超音波風速計、熱電対による

Fig.11. Time histories of w-velocity fluctuation at  $z=5-60$  mm (Case S2)

Fig.12. Time histories of u-velocity fluctuation at  $z=5-60mm$  (Case S2)



Fig.13. Time histories of temperature fluctuation at  $z=5-60$  mm (Case S2)

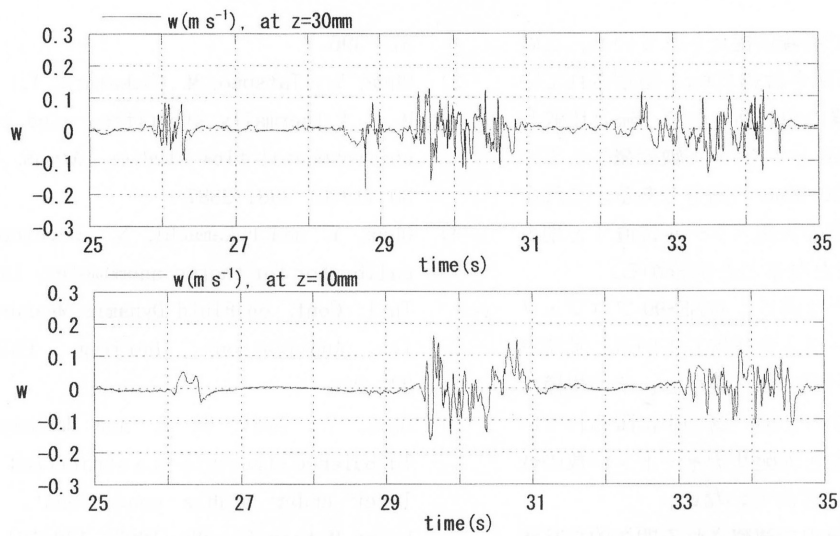


Fig.14. Simultaneous measurement of  $w$ -velocity fluctuations at two different heights (upper,  $z=30\text{mm}$ ; lower,  $z=10\text{mm}$ ), Case S2.

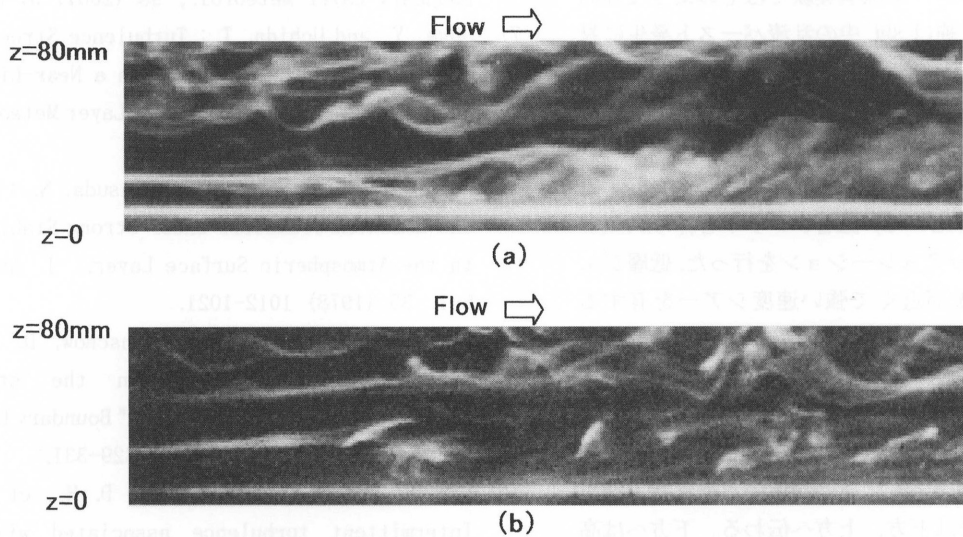


Fig.15. Flow visualization of SBL with low-level jet (Case S2). Side view of around  $x=9\text{m}$ . Flow is left to right. A turbulent bursting occurs.

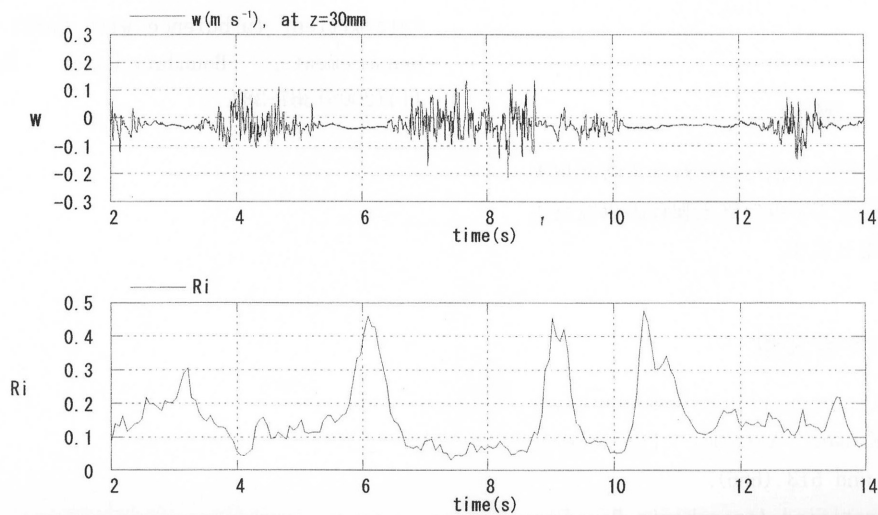


Fig.16. Time histories of  $w$ -velocity fluctuation and corresponding Richardson number at  $z=30\text{mm}$ , Case S2.

w速度変動、気温変動で明確に捉えられている。このときの強安定SBLのLLJ高さは約200mと推定されているが、これを本風洞実験のSBL高さ $\delta=0.16\text{m}$ と比較してスケール比を約1/1250とする。本実験で発生している乱流バーストは約 $z=20\text{--}30\text{mm}$ の高さである。これを上記のスケール比で実際の気象スケールに直すと地表面から約25–38mの上空となることが分かる。

Nakamura and Mahrt<sup>11)</sup>は同じくCASES99プロジェクトで観察された乱流バーストを報告している。乱流バーストは主に高さ5m付近で多く発生し、その規模は60mタワー高さよりもずっと薄い層の中に限られている。乱流バーストの発生と勾配リチャードソン数の低下との明確な関係は見出されていない。

実際の気象安定境界層中で観察される間欠的な乱流バーストは、その発生原因について、メソスケールの擾乱、重力波、Density Current などさまざまな要因が議論されているが、本風洞実験ではそのような外的要因はない。本実験はSBL中の乱流バースト発生に対して一つの示唆を与えるものと考えられる。

#### 4. 結論

温度成層風洞を用いて、低層ジェットを伴う気象安定境界層(SBL)のシミュレーションを行った。低層ジェットのために地表面近くで強い速度シアを有するSBLに対し、安定度を変えて乱流特性に及ぼす効果を調べた。

その結果、安定度を高めたケースS2のSBLでは床面近くで間欠的な乱流バーストが発生することを見出した。この乱流バーストは床面から少し離れた上空で発生し、その影響は下方、上方へ伝わる。下方へは高速、高温塊を運び、上方へは低速、低温塊を運ぶ。

乱流バーストが発生する高さでは、バースト状態のときリチャードソン数は低い値となり、バーストが生じていない非乱流状態では高いリチャードソン数の値となっている。

#### 謝辞

風洞実験、データ解析を手伝ってくれた当時九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻修士課程の岩坂公志君、國分博士君に感謝します。

#### 参考文献

- 1) Stull, R. B. : An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, (1988) 499–502 and 513 (666).
- 2) Mahrt, L. : Stratified Atmospheric Boundary Layers, Boundary-Layer Meteorol., 90 (1999)

- 375–396.
- 3) Ohya, Y., Tatsuno, M., Nakamura, Y., and Ueda, H. : A thermally stratified wind tunnel for environmental flow studies, Atmos. Environ., 30 (1996) 2881–2887.
- 4) Ohya, Y. and Fukamachi, N. : Development of a calibrator for thermo-anemometer, in Proc. 3rd Intl. Conf. on Fluid Dynamic Measurement and Its Applications, Beijing, China, (1997) 223–226.
- 5) Ohya, Y., Neff, D. E. and Meroney, R. N. : Turbulence structure in a stratified boundary layer under stable conditions', Boundary-Layer Meteorol., 83 (1997) 139–161.
- 6) Ohya, Y. : Wind tunnel study of atmospheric stable boundary layers over a rough surface, Boundary-Layer Meteorol., 98 (2001) 57–82.
- 7) Ohya, Y. and Uchida, T. : Turbulence Structure of Stable Boundary Layers with a Near-Linear Temperature Profile, Boundary-Layer Meteorol., 108 (2003) 19–38.
- 8) Kondo, J., Kanechika, O. and Yasuda, N. : Heat and Momentum Transfers under Strong Stability in the Atmospheric Surface Layer, J. Atmos. Sci. 35 (1978) 1012–1021.
- 9) Sun, J., Burns, S. P. and Lenschow, D. H. : Turbulence intermittency in the stable boundary layer, Proc. of the 14<sup>th</sup> Boundary Layer & Turbulence, Aspen, (2000) 329–331.
- 10) Sun, J., Burns, S. P., Lenschow, D. H., et al. : Intermittent turbulence associated with a density current passage in the stable boundary layer, Boundary-Layer Meteorol., 105 (2002) 199–219.
- 11) Nakamura, R., and Mahrt, L. : A study of intermittent turbulence with CASES-99 tower measurements, Boundary-Layer Meteorol., 114 (2005) 367–387.