

〔原著論文〕

都市キャノピー近傍における組織的乱流運動

*清水建設(株)技術研究所 孟 岩・老 川 進

都市キャノピーにおける垂直乱流構造および組織的な乱流運動を明らかにするために、札幌市郊外の住宅地（平均高さ $h=7\text{m}$ ）において1991年から1992年にわたって野外観測を行った。観測高さは、それぞれ5.4m, 10.3m, 18m, 35m および45m である。その結果、変動風速の標準偏差 σ_u の垂直分布はキャノピー上でブロードなピークを持ち、一方、 σ_v および σ_w はほぼ均一な分布となっていることが分かった。レイノルズ応力の垂直分布は、キャノピー高さの1.5倍付近で弱いピークを示し、それ以上の高度ではゆっくりと減少する。また、レイノルズ応力の高い値を持つ層は、高速流体塊の下層への流入 (sweep) および低速流体塊の上層へ噴出 (ejection) する2つの特徴的な乱流運動によって形成されていることが、4象限解析により明らかにされた。更に、アンサンブル平均法により ramp 現象に伴う流れ場と温度場の構造が示され、組織運動が起こした上昇流および下降流はキャノピー内外における熱の垂直輸送に重要な役割を担っていることが明らかとなった。

Organized Motion in and above an Urban Canopy

Yan MENG and Susumu OIKAWA

Environmental Engineering Department,

Institute of Technology SHIMIZU CORPORATION

(Received 18 January, 1995; in revised form 30 March, 1995)

To investigate turbulence characteristics and organized motion within and above the urban canopy, field observations were conducted in July 1991 and Nov. 1992 in Sapporo, Japan. The measurement heights were 5.4m, 10.3m, 18m, 35m and 45m aboveground; the canopy height was 7m. The profiles of σ_u peaked slightly above the canopy, while σ_v and σ_w had nearly uniform profiles. Vertical profiles of Reynolds stress peaked slightly at 1.5 times the canopy height and decreased slowly with height thereafter. A four-quadrant analysis showed that sweep and ejection motions caused the higher layer of Reynolds stress, during which high-velocity fluid from above moves downward toward the surface and low-velocity fluid from below moves upward. An ensemble-averaging technique was used to isolate typical features of the flow and temperature fields. A time-height cross section of velocity vectors and temperature contours showed details of the flow structures associated with temperature ramps. It has been noted that the organized motions play important roles in the transport of heat near the urban canopy, where the sweep motion causes negative temperature fluctuation and the ejection motions causes positive temperature fluctuation.

(KEY WORDS): Field study, Urban canopy, Organized motion, Turbulence characteristics, Sweep and ejection

1. はじめに

都市域において自動車や煙突から排出される多量の大気汚染物質は、深刻な大気汚染問題を起している。これらの大気汚染物質の多くは、都市キャノピー層 (urban canopy layer¹⁾) とその上部の層である roughness sublayer²⁾ に排出される。これらの層内の流れは、建物などの粗度要素の存在により、機械的、また熱的な影響を強く受けている。汚染物質の拡散プロセスは大気の乱流性状に大きく依存するため、キャノピー近傍の大気拡散現象の解明には、キャノピー層内外における複雑な乱流を明らかにする必要がある。

都市域における乱流観測の例としては、Graham³⁾, Bowne and Ball⁴⁾, Brook⁵⁾, Jackson⁶⁾, Högström et al.⁷⁾, Clarke et al.⁸⁾, Uno et al.⁹⁾, Rotach¹⁰⁾, Rotach^{11, 12)}, Roth and Oke¹³⁾ および Roth¹⁴⁾ などの報告があげられる。これらの研究は、都市上層において乱れの大きな領域が存在していることと、乱れの大きさおよびレイノルズ応力は高さと共に減少することを示している。

最近、Rotach¹¹⁾ は、都市キャニオンにおいて乱流観測を行い、高速流体の下層への流入 (sweep) および低速流体の上層への流出 (ejection) の2つの特徴的な乱流運動がキャニオン内および上層において間欠的に生じていることを報告した。このことは、都市域において組織的な乱流運動が存在することを示唆している。

このように、既往の研究のほとんどは、都市キャノピー層のかなり上あるいはその内に限られたもので、都市キャノピー内外にわたる広い範囲での乱流統計量及び組織運動の鉛直特性については、まだ不明である。本研究は、都市キャノピー内外の流れ場の垂直乱流構造および組織的乱流運動を明らかにすることを目的とし、3台の超音波風速計をキャノピー内およびその上層の異なる高さに設置し都市郊外の住宅地で野外観測を行った。本論文では、まず、キャノピー内外の乱れの統計的性質を述べ、そしてレイノルズ応力の生成プロセスおよび組織的乱流運動のアンサンブル平均像を明らかにする。

2. 観測方法

観測は、札幌市の中心より北西10kmにある住宅地にて行った。観測点の北西側30mの所から平均建物高さ7m、建蔽率約25%の均一な住宅が続いている。観測点の南側は、北海道工業大学のサッカーグラウンドであり、北東から南東方向に200mまでは開けた平坦地である。観測点を住宅地内に設置する (実際には困難) のは、理想的であるが、住宅地から30m離れた所に設置しても、キャノピーの乱流特性がなお維持されていると考える。詳しいことは section 3 で説明する。今回の観測は上流に住宅が連なる北西風を選択した。写真1に観測点の上流の北西方向にある建物の配置状況を示す。

図1に観測機器の設置状況を示す。18mと10.3mの高さに設置した超音波風速計のプロープはポールの頂部に取り付け、高さ5.4mのプロープは、ポールから1mの腕を出し、その先端に取り付けた。ここで高さ45m (一部35m) の観測は、超音波風速計をクレーンの上部により吊り下げて観測した。この超音波風速計は、大型のゾンデに搭載可能なように Ogawa and Ohara¹⁵⁾ により特別に設計されたものである。観測に用いた海上電機(株)の超音波風速計の風速分解能は0.005 m/sで、温度分解能は0.025°Cである。また、データサンプリングは10Hzで行った。10分における6000個のデータを1 Runとしてデータを解析した。

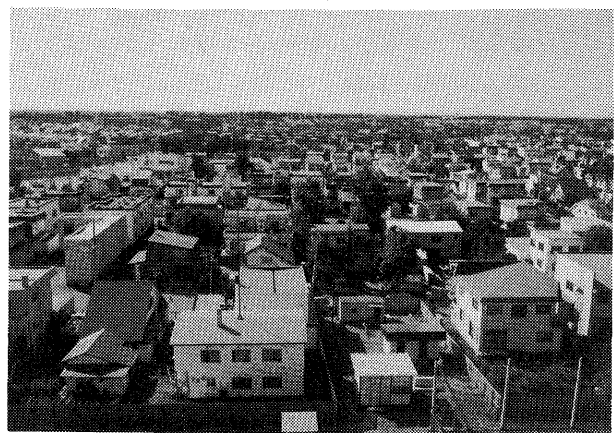


写真1 観測点から北西側を望む建物の配置状況

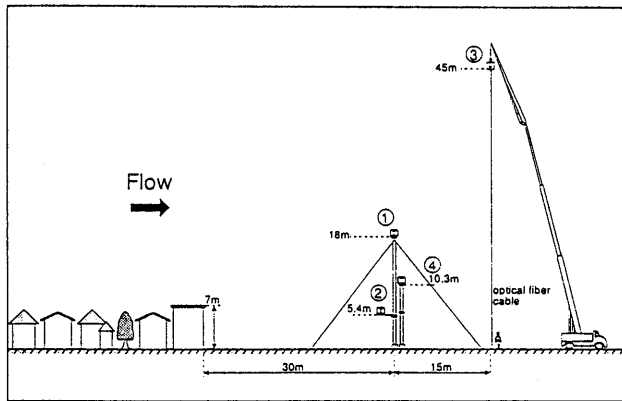


図1 野外观測機器の設置状況

本研究で報告するデータは2つの期間に観測したものである。1991年 (Period A) の観測では、ポール高さ5.4mと18mおよびクレーンにつり下げた高さ45mの3高度に超音波風速計を設置し、キャノピー内および上方の全層にわたり乱流観測を行った。1992年 (Period B) の観測では、キャノピー近傍の組織的な運動を明らかにするため、ポール上の5.4m、10.3mおよび18mの3高度に超音波風速計を設置した。組織的な運動のスパン方向 (主流に対して横方向) の構造を検討するために、10.3mのポールは18mポールより横方向に18.7m離れたところに設置した。風上側の地形の2次元性を考えると、横方向に異なった地点で得られた2つのポールの平均風速および乱れの統計量は、あたかも1地点で得られたデータとして扱うことができる。

Period Aは1991年の7月9~13日の5日間に30時間の観測を行った。この間の9~11日には、クレーンにつり下げた超音波風速計により5時間のデータを収録した。また、Period Bは、1992

年の11月11~13日に合計22時間の観測を行った。

2つの期間における大気の状態および乱流特性を表1に示す。ここで、 z は地表からの測定高さであり、 z' は $z' = z - d$ で表せる。また、 d ($=2.3\text{m}$)はゼロ面変位 (zero-plane displacement) であり、Counihan¹⁶⁾の方法にて算定した。ここで、 U はベクトル平均風速を表し、 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ は平均風向方向、水平直角方向、鉛直方向の変動風速成分 (u', v', w') の標準偏差を示す。また、摩擦速度 $u_* (= \sqrt{-\overline{u'w'}})$ は、渦相関法により求めた値であり、 L は $L = -u_*^3 T_0 / \kappa g w' \theta'$ で定義される Monin-Obukhov の長さ、 θ' は温度変動成分である。また κ はカルマン定数 (κ は0.41を使用)、 T_0 は温位、 g は重力加速度を表す。観測は晴天および曇日の日中に行った。観測時における大気安定度は、 z'/L (at $z=18\text{m}$) の値が各々 -0.23 (Period A) と -0.08 (Period B) であり、弱い不安定の状態である。

異なった期間の観測値を比較するため、高さ18mで測定した摩擦速度をリファレンス速度 u_{*r} とした。この高さは、建物粗度の影響を直接受けず、roughness sublayer の代表値を表わす。組織的運動のアンサンブル像の解析時に用いたデータをまとめて表2に示す。

3. 乱流統計解析の結果

図2(a)に超音波風速計を用いて観測した平均風速分布を示す。縦軸は、無次元化した高さ z/h (h : キャノピー高さ7m) で表示した。○印 (Period A) および□印 (Period B) は9 Run の平均値を示し、エラーバーは標準誤差を表す。図中の一点鎖線は次式で算定した非中立時の風速分

表1 野外观測における流れの特性データ (9 Run の平均値)

Date	z (m)	U (m/s)	σ_u (m/s)	σ_v (m/s)	σ_w (m/s)	u_* (m/s)	$\overline{w'\theta'}$ (m/s·K)	L (m)
Period A July 1991	45.0	3.8	0.72	0.82	0.68	0.41	0.12	-44
	18.0	3.3	0.96	0.91	0.67	0.54	0.17	-68
	5.4	2.3	0.94	0.97	0.61	0.49	0.14	-61
Period B Nov. 1992	18.0	5.7	1.29	1.25	0.76	0.60	0.08	-190
	10.3	3.7	1.49	1.17	0.75	0.64
	5.4	2.9	1.26	1.13	0.71	0.54	0.06	-185

表2 組織運動のアンサンブル平均像の解析に用いたデータの特性 ($z=18\text{m}$)

Date	Run	Observation period	U (m/s)	u_* (m/s)	$\overline{w'\theta'}$ (m/s \cdot K)	L (m)
Nov. 11, 1992 (Period B)	B01	13:25-13:35	7.1	0.67	0.08	-250
	B02	13:45-13:55	7.4	0.89	0.10	-478
	B03	13:55-14:05	6.7	0.58	0.04	-320
	B04	14:05-14:15	7.2	0.76	0.06	-552
	B05	14:33-14:43	7.4	0.60	0.03	-515

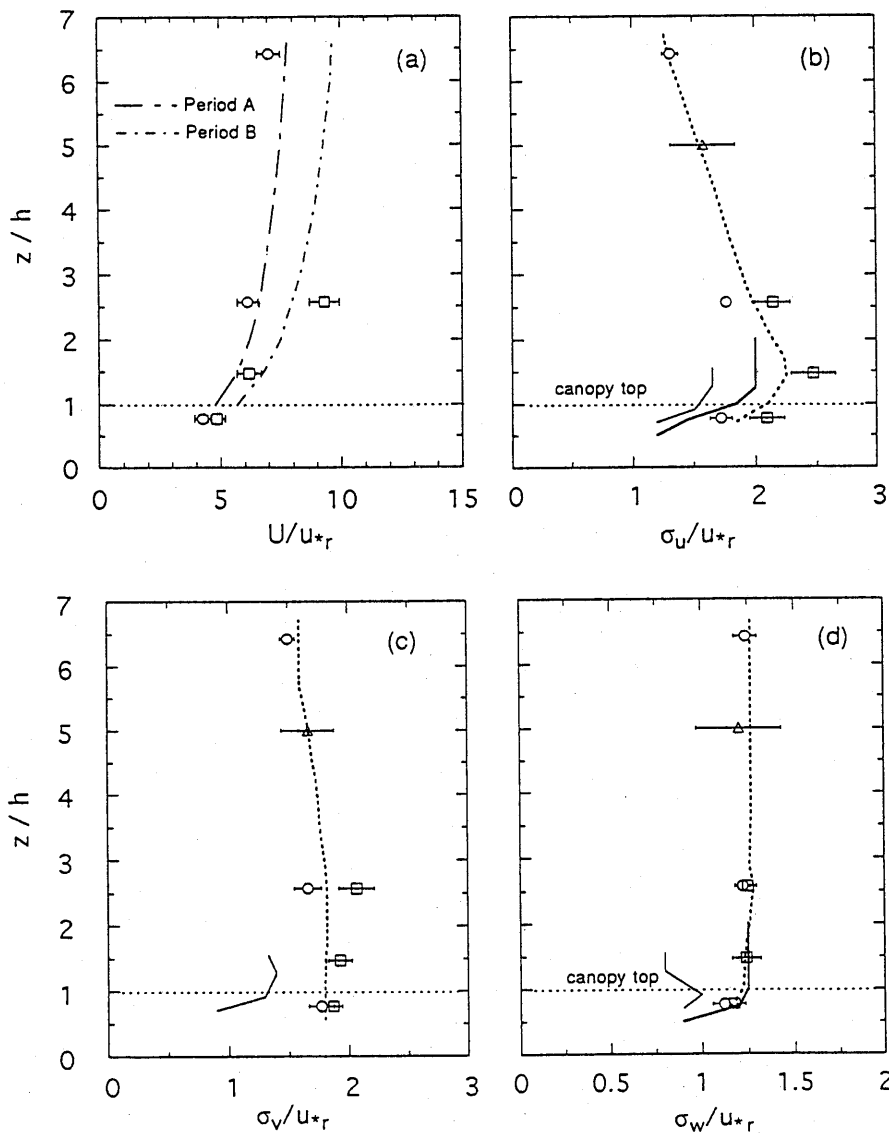


図2 基準化した(a)平均風速, (b) σ_u , (c) σ_v , (d) σ_w の垂直分布

○印 (Period A) と□印 (Period B) は9 Run の平均値を表し, △印 (Period A) は3 Run の平均値を示す。エラーバーは標準誤差を表す。図(a)の一点鎖線は, $U/u_* = (1/\kappa) \{ \ln(z/Z_0) - \psi(z/L) \}$ 式で算定した風速分布を示す。図(b)~(d)において, 点線は観測値に対しフリーハンドで引いたものであり, 太い実線は Raupach²⁰⁾ の風洞実験 ($h=60\text{mm}$) の結果を示し, 細い実線は Rotach¹¹⁾ が都市キャニオン ($h=18.3\text{m}$) で観測したデータを示す。

布を表す。

$$U/u_* = (1/\kappa) \{ \ln(z'/z_0) - \phi(z'/L) \} \quad (1)$$

ここで、 $\phi(z'/L)$ は Monin-Obukhov の普遍関数を表し、 z_0 は Lettau¹⁷⁾ により提起された方法で予測した粗度長 (=0.45m) を表し、Monin-Obukhov の長さ L は高さ 18m における値である。計算により得られた風速分布は、本観測の値とほぼ同様な傾向を示している。Period A と Period B の両期間の風速分布の差異は安定度の違いによるものと説明される。

図 2 (b)~(d) には、変動風速の標準偏差を高さ 18m の摩擦速度 u_{*r} で基準化した垂直分布を示す。図中の太い実線は Raupach¹⁸⁾ の風洞実験 ($h=60\text{mm}$) の結果を示し、細かい実線は Rotach^{10, 11)} が都市キャニオン ($h=18.3\text{m}$) で観測したデータを示す。 σ_u の垂直分布はキャノピー上にブロードなピークを示し、更にその上層で σ_u の値は高さとともに減少する。一方、 σ_v および σ_w の垂直分布は概ね一定の値を示す。Period A および Period B の両期間における σ_w/u_* の値はよい一致を示すが、 σ_u/u_* および σ_v/u_* の両期間の値は少し異なっている。Panofsky and Dutton¹⁹⁾ は、平坦地における中立時の σ_v/u_* 、 σ_u/u_* および σ_w/u_* の値が各々 2.4、1.9 および 1.25 を推奨しており、本観測のキャノピー上の値は彼等の推奨値とほぼ同様な値を示している。また、本観測の乱れの垂直分布は Raupach の風洞実験の結果と一致している。一方、Rotach の都市キャニオンで観測した値は、本観測で得られたものより低い値を示している。これは、Rotach が用いているリファレンス u_{*r} の値が過大に見積もられているためと考えられる。

図 3 には、 u_{*r}^2 で無次元化したレイノルズ応力の垂直分布を示す。レイノルズ応力の垂直分布は、キャノピー上部 1.5h 付近に弱いピークを持ち、更にその上でレイノルズ応力の値は高さとともに減少する。比較するために Raupach¹⁸⁾ の風洞実験および Rotach^{10, 11)} の都市キャニオンで観測したデータを、太い実線と細かい実線で示す。本観測におけるレイノルズ応力の垂直分布は、建物高さの 2 倍以下の範囲において Raupach の風洞実験

の結果とほぼ一致している。しかし、Rotach の観測データは、本観測および他のキャノピーのデータより低い値を示している。Rotach の用いたリファレンス u_{*r} の値 (at $z/h=2.07$, $h=38\text{m}$) は直接測定されたものでなく、 $u_{*r} = \kappa z' (dU/dz')$ / $\Phi_m(z'/L)$ という式を用いて求めたものである。Rotach は、上式の内速度勾配を屋根面上に観測された風速分布の最上端のデータを基に算出した。ここで $\Phi_m(z'/L)$ は、無次元風速勾配に関する半経験関数である。しかし、屋根面上の流れ場は強く建物の影響を受けているため、この式を用いて u_{*r} を正しく評価することはできない。Rotach の観測データが、本観測および他のキャノピーのデータよりも低い値を示していることから考えると、彼の用いた u_{*r} の値が過大評価されている可能性がある。また、Rotach は都市キャノピーにおけるレイノルズ応力の値が、高さとともに増加すると結論づけたが、彼の観測範囲は 1.5h までにとどまるため、この結論は明らかにキャノピーの近傍に限られるべきである。

以上結果をまとめると、都市キャノピー近傍において、主流方向の変動風速の標準偏差 σ_u の分布はキャノピー上でブロードなピークを持ち、一方、主流と直角となる方向の変動風速の標準偏差 σ_v と鉛直方向の変動風速の標準偏差 σ_w はほぼ均一な分布を示す。また、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の垂直分布は、キャノピー高さの 1.5 倍のところ

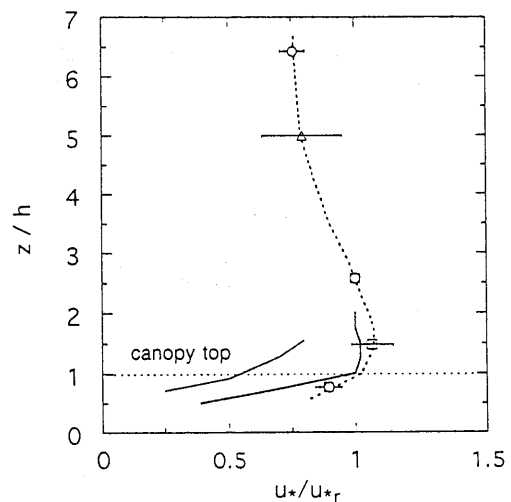


図 3 基準化したレイノルズ応力の垂直分布
図中の記号などは図 2 (b)~(d) に同じ。

に弱いピークをもち、それ以上の高度でゆっくりと減少する。今回の観測では、観測点が住宅地内に設置していないため、ここで得られた結果が都市キャノピーの乱流特性を厳密に代表しているかどうかは検討する余地が残るが、住宅地から30 mしか離れていないことから、キャノピーの乱流特性がなお維持されていると考えられる。このことは、図2の変動風速の標準偏差及び図3のレイノルズ応力の垂直分布にて、風洞実験の結果とよく一致していることから裏付けられている。従って、本研究では、キャノピー平均高さ以下の範囲をキャノピー内、またその以上の高さ範囲をキャノピー外と呼ぶことにする。

4. 組織運動

4.1 4象限法による解析

図4は、高度18mおよび5.4mの速度変動、温度変動および瞬時レイノルズ応力の時系列プロットを示す。このRun (B02)は、1992年の11月11日の13:45~13:55に観測されたものであり、大気が弱い不安定 ($L = -478\text{m}$ at $z = 18\text{m}$) の状態にある。また、図示したプロットは1秒間の移動平均により平滑化したものである。ここで特徴的なことは、正の瞬時レイノルズ応力 ($-u'w' > 0$) が、ほぼ同時刻にキャノピー上層18mとキャノピー内5.4mにおいて出現している。sweep時 ($u' > 0, w' < 0$) においては、上方からの高速流が地表方向に移動し、この流れに伴い、冷たい

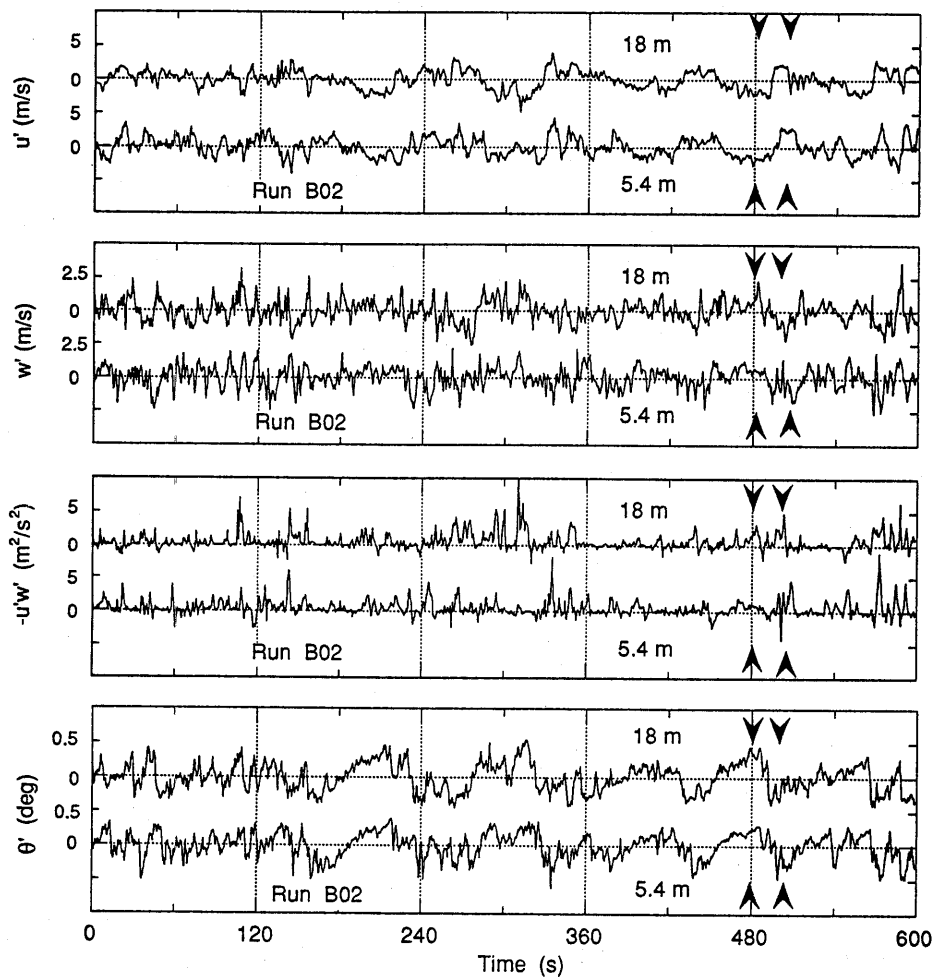


図4 高度18m および5.4m における速度変動 (u' , w'), 瞬時レイノルズ応力 ($-u'w'$) および温度変動 (θ') の時間変化 (Run B02). 矢印は sweep および ejection 運動の一例を表す。

空気はキャノピーの上方から下方に輸送され負の温度変動を生じさせる。一方, ejection 時 ($u' < 0, w' > 0$) には, 低速流が下方から上方に運ばれ, この流れに伴い, 暖かい空気が持ち上げられ正の温度変動を起こす。図5に, 高度18m

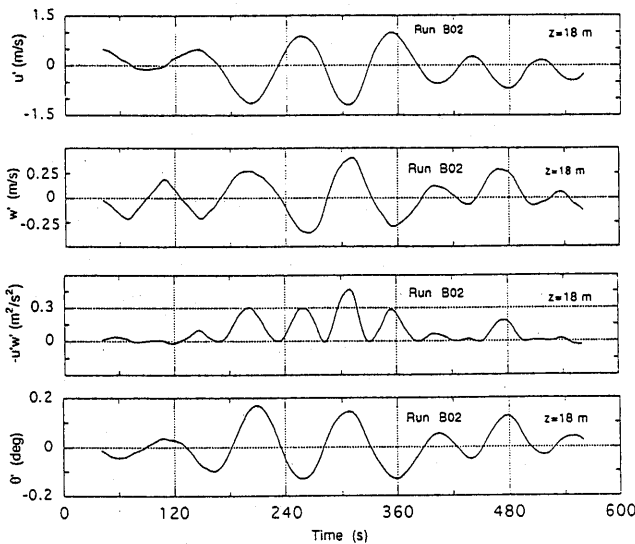


図5 平滑化した u' , $-u'w'$ および θ' (Run B02, $z = 18\text{m}$)

のデータを移動平均により平滑化した例を示す。sweep および ejection が約100秒の周期で生じていることが分かる。この値は, threshold hole size H を2とした場合の組織運動の周期に対応している。他の実験結果と比較するために, 今回の観測で得られた ejection 運動の周期化 $T_E = 100\text{sec}$, $H = 2$; RunB02) を摩擦速度 $u_* (= 0.89\text{m/s}; \text{at } z = 18\text{m BO2})$ と境界層高さ $\delta (= 0.11 u_* / f = 980\text{m})$ で無次元化し, $T_E u_* / \delta = 0.09$ という結果が得られた。実際の都市での組織運動の周期を観測した例がほとんどないため, Raupach²⁰⁾ が行った風洞実験の結果を比較の対象とする。Raupach²⁰⁾ の論文によると, 粗度層近傍での ejection 運動の無次元周期 $T_E u_* / \delta$ の値 (threshold hole size $H = 2$) は約0.1である。今回の観測結果は, Raupach²⁰⁾ の風洞実験の結果とほぼ一致している。

図6(a)には各象限におけるレイノルズ応力 $-\langle u'w' \rangle_i / u_*^2$ の垂直分布を示す (Period A と Period B の平均値)。乱流エネルギー生成に正の寄与をする第2象限 (ejection) および第4象限 (sweep) の値が, 第1象限 (outward interac-

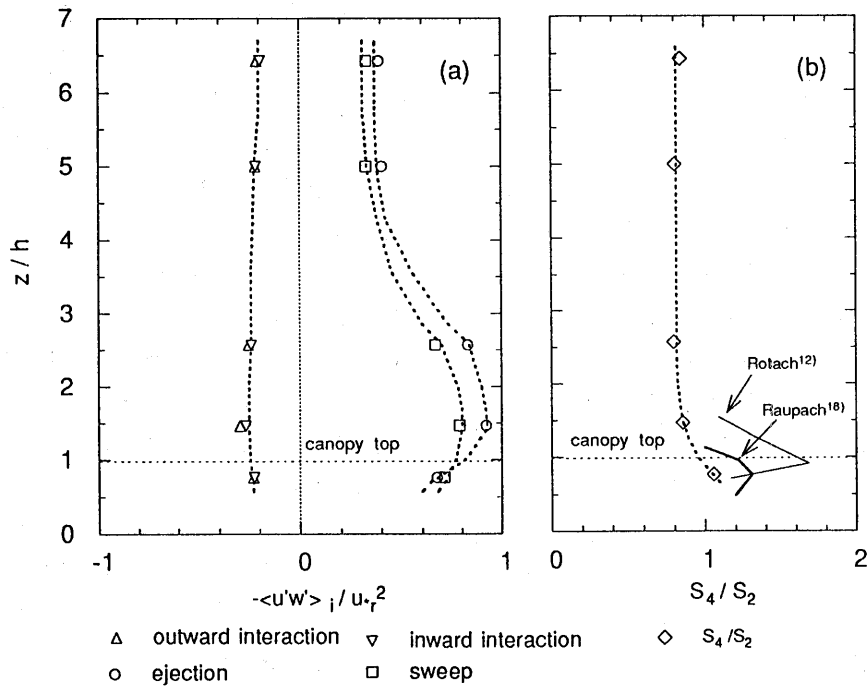


図6 (a)各象限における基準化したレイノルズ応力 $-\langle u'w' \rangle_i / u_*^2$ の垂直分布および(b)sweep と ejection の比 ($S_4/S_2 = -\langle u'w' \rangle_4 / -\langle u'w' \rangle_2$) の垂直分布

tion) および第3象限 (inward interaction) の値に比べ、かなり大きくなっている。outward および inward interaction は乱れエネルギー生成に対し重要な役割を担っていないことが分かる。また、キャノピー層内外において、outward および inward interaction は、ほぼ一様に分布しているのに対し、第2象限の ejection および第4象限の sweep は、キャノピー上部にピーク値を持つ。図3に示されたキャノピー上部のレイノルズ応力のピークの形成は組織構造によるものと説明される。また、ejection および sweep 運動の寄与率が20mより上方で急速に減少していることから、キャノピー近傍の組織運動の上限が3~4hに存在すると推定される。図6(b)には各高度の sweep と ejection の比 ($S_4/S_2 = -\langle u'w' \rangle_4 / -\langle u'w' \rangle_2$) の垂直分布を示す。細い実線と太い実線は、各々、Rotach¹¹⁾の都市キャニオンで観測したデータ ($h=18.3\text{m}$) と Raupach¹⁸⁾の風洞データ ($h=60\text{mm}$) を示す。 S_4/S_2 の比は高さとともにゆるやかに減少する。本観測は、風洞実験の結果と同様な傾向を示す。

キャノピー層 (粗面) 上の組織構造と平板乱流境界層上の組織構造との相違があるかどうかについては、大変興味のある問題であるが、2つの流れ場に存在する組織構造の違いを直接に示すような実験あるいは観測データが少ないため、この問題についてはこれまでほとんど論じられていない。しかし、組織構造の相違が直接論じられなくても、組織構造の性質を代表する特性量——ejection 運動の周期 T_E と摩擦速度 u_* についての考察を行えば、滑面上の組織運動とキャノピー層 (粗面) 上の組織構造との違いについては一定の理解が得られる。ここで、滑面から粗面まで6種類の異なった境界層を対象とした Raupach²⁰⁾の風洞実験の結果を用いて、滑面と粗面における ejection 運動の無次元周期 $T_E U / \delta$ と無次元摩擦速度 u_* / U についての考察を行う。Raupach²⁰⁾の実験データを整理し直すと、滑面と粗面 (キャノピー層) との違いははっきりと現れている。例えば、滑面での ejection 運動 (threshold hole size $H=4$) の無次元周期は3.6で、粗面 (粗度要素の占有面積率が約20%となるケース) での値

は2.1となる。また、滑面で無次元摩擦速度は0.036で、粗面での値は0.061となり、その差は約1.7倍である。滑面より粗面で無次元摩擦速度が大きくなることは大気境界層に関する既往の研究からも知られている。摩擦速度が大きいということはレイノルズ応力が大きいということと等価であることを考えると、上空風速が同じである場合、滑面より粗面上で多くのレイノルズ応力が作られていることが分かる。また、レイノルズ応力の多くが組織構造によって作られていることを考えれば、この違いは滑面と粗面上の組織構造の違いを表していると思われる。一般的に、粗面での風速分布には粗度近傍において変曲点があるのに対し、滑面ではこれが存在しない。変曲点がある流れ場では変曲点不安定が起り、組織構造が発生すると Raupach et al.²¹⁾が説明している。しかも、粗面上の組織構造が、滑面上の組織構造に比べてより強い2次元性を持っていると考えられる。このことは本研究によりも裏付けられている (Section 4.2で示す)。滑面での組織構造と粗面 (キャノピー層) での組織構造との違いは、この2つの流れ場の中に内在する基本的な不安定メカニズムの違いによるものと説明される。

4.2 組織運動に伴う流れ場および温度場

植生キャノピー近傍における典型的な組織運動は、周期的に発生する温度の ramp 現象である。この温度の ramp 現象は、ゆるやかな温度上昇の後に急激な温度降下が生じることで特徴づけられる。温度の ramp 現象を直接的に観測したのは、Bergström and Högström²²⁾ および Gao et al.²³⁾による研究である。Gao et al.²³⁾は、高さ18mの森林キャノピーを観測し、温度および湿度の時系列において、繰り返し多くの ramp パターンが出現していることを確認した。これらの ramp パターンが植生キャノピー内外においてほぼ同時刻に現れるのは特徴的である。一方、都市域においては、いままでに温度の ramp 現象を報告した例がなく、また、日中、都市キャノピー内外における気温場の形態と乱流組織運動との関係を論じた例もない。本研究は、Gao et al.²³⁾と同様な手法を用いて、都市キャノピー近傍における ramp パターンとそれに伴う流れ場を詳しく調べた。

図7には ramp 現象の例を示し、ゆっくりした温度上昇の後に、急激に温度降下が生じている。この現象が1~3秒の間に生じ、温度降下量は0.8°Cである。また、この ramp 現象は高度5.4mと18mにおいて、ほぼ同時に生じている。キャノピー内外に生じている相対的に大きな ramp 現象を抽出するために、アンサンブル平均法を用いて解析を行った。瞬間的な物理量 S は、移動平均値 \bar{S} と移動平均からのずれ分 s' とで表され、また移動平均からのずれ分 s' は、組織運動の成分 \tilde{s} と高周波的なランダムな乱れの成分 s'' に分解される (Reynolds and Hussain²⁴⁾。

$$S = \bar{S} + s' = \bar{S} + \tilde{s} + s'' \quad (2)$$

Gao et al.²³⁾の方法に習い、速度と温度成分の平均値は10分間の移動平均をとる。いくつかの ramp 現象をアンサンブル平均することにより小さなスケールのランダムな乱れが取り除かれ、組

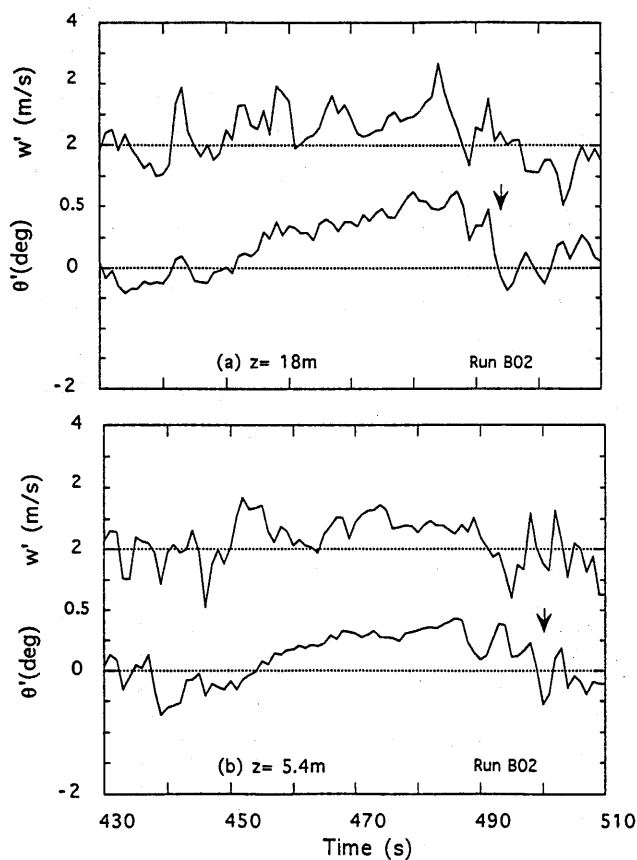


図7 ramp 現象の例
矢印は ramp のエッジを示す。(a) $z = 18\text{m}$
(b) $z = 5.4\text{m}$

織的な運動がより明瞭となる。手順としては、まず高さ18mのデータをもとに、急激な温度降下を伴う個々の ramp 現象を主観的に抽出した。次に、シャープな温度降下の点を検出し、その点を中心にすべての高さの温度および速度データを保存した。最後に、40分間 (Runs B02~B05) のデータより合計10個の ramp パターンを抽出しアンサンブル平均を行った。

図8には、10個の ramp パターンのアンサンブル平均により得られた組織運動成分 \tilde{u} , \tilde{w} および $\tilde{\theta}$ を示す。ramp 現象は速度場と強い相関を持ち、温度の上昇が見られる時間では低速上昇流 (ejection 運動) が発生し、また、温度低下が見られる時間では高速下降 (sweep 運動) が発生している。大規模な ramp 運動が大規模の組織運動にほぼ完全に対応している。更に、これらの ramp 運動が観測された時の大気が中立に近い状態にあることを考えると、温度の ramp 運動が浮力による現象というより、流れ場の組織運動に伴って生じている現象と言うべきであろう。従って、

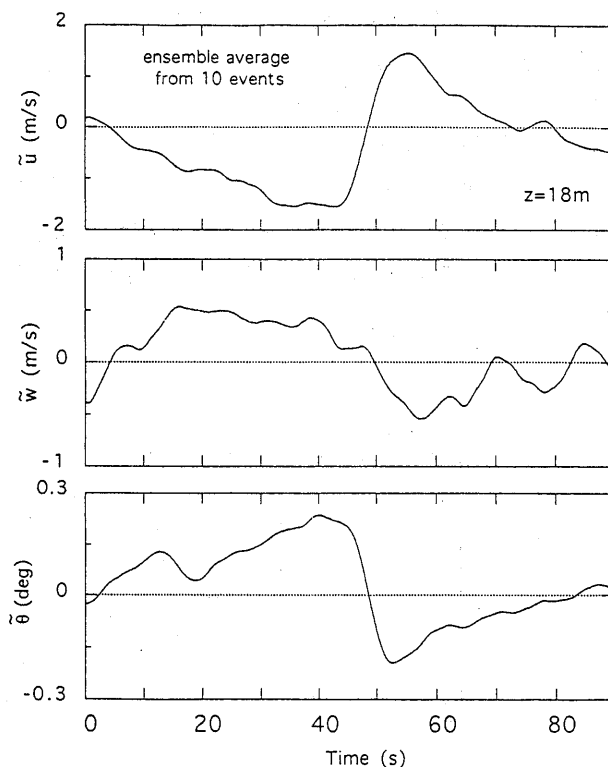


図8 10個の ramp パターンのアンサンブル平均により得られた組織運動成分 \tilde{u} , \tilde{w} および $\tilde{\theta}$

温度の ramp 現象を調べることは、温度変動をアンサンブル平均の条件とし、流れの構造を調べることと同じ意味である。本研究で観測された ramp 構造の平均水平スケールは約480mで、温度の下降部分の水平長さは約全体の半分240mである。水平スケールの値は ramp 運動の時間スケールを100秒とし、高度10.3mの平均風速4.8m/sを用いて算定した。Bergström and Högström²²⁾は、高さ20mの森林で温度場および湿度場における組織運動を観測し、温度 ramp の下降部分の水平スケールは平均で238mであることを報告している。この水平スケールは、本観測で得られたものと同オーダである。

図9は、高さ5.4m、10.3mおよび18mでのアンサンブル平均した速度変動 \tilde{u} , \tilde{w} と温度変動を xz 断面に示すものである。組織運動の空間的なイメージを表すために、横軸（時間軸）を逆にして表示した。10.3mの高さのデータは他の2点と測定位置が異なるために点線の矢印で示した。この図から組織運動の xz 断面内のアンサンブル平均像がはっきりとみられる。10.3mと18mポールは水平距離が18.7m離れて設置されているにもかかわらず、2点間の時間変動は強い相関を示している。特にスケールの大きな sweep と ejection 運動はほぼ同時刻に2つの地点で起こっており、両地点の速度変動（20秒の移動平均で平滑化したもの）の空間相関係数は0.8である。このことは、都市キャノピー近傍の組織運動が横

方向に強い相関を持つことを表し、組織運動が2次元性を持っていることを示唆している。図5及び図9から考えあわせると、キャノピー上の組織運動の概念図が図10のように描ける。

キャノピー上の組織構造の生成メカニズムは、キャノピー近傍の風速分布に存在する変曲点により生じた流れ場の不安定によるものと説明される。最近、Kanda and Hino²⁵⁾は、Large Eddy Simulation モデルを用いて植生キャノピーの内外の乱流場を計算し、風速分布の変曲点不安定が植生境界に組織的な運動が発生させることを示した。

図9には、速度ベクトル場に重ね合わせてアンサンブル平均した温度変動の分布も示している。点線および実線は、各々温度変動が平均値以下の値と平均値以上の値を0.05°C刻みで表示したものである。温度変動のゼロ値を示す線が上昇流および下降流の領域を分離し、各々の領域に正および負の温度変動が生じている。その結果、正の熱フラックスが作られ、キャノピー内外の温度場が均一化されることになる。この正の温度変動は ejection 運動によって起こされ、負の温度変動は sweep によって起こされていることから考えると、本観測で得られた組織運動は、キャノピー内外で熱の輸送に重要な役割を担っていることが明らかである。

一般に、都市キャノピー近傍の大気においては、日中、安定度の大きな変化が生じない。それは、十分に混合された都市大気層が強い温度勾配を破

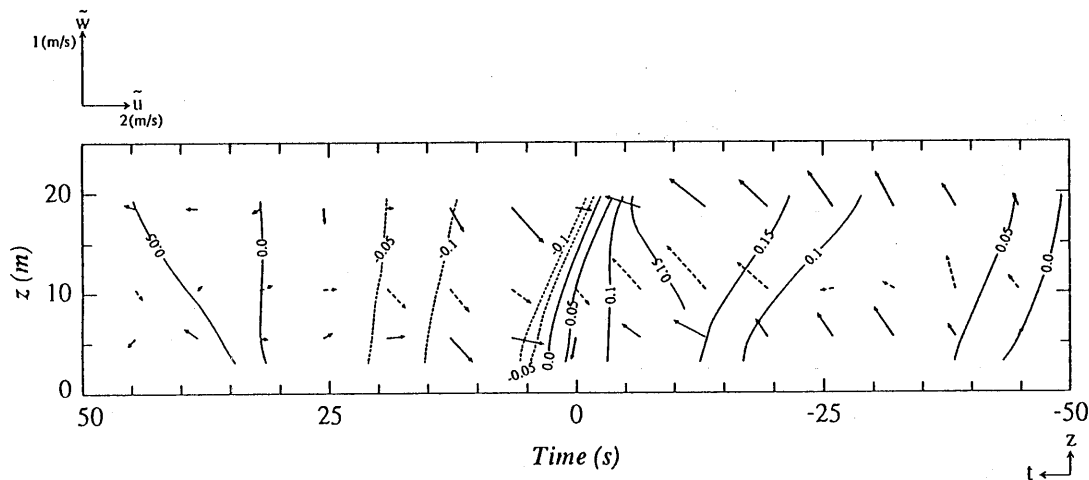


図9 xz 断面におけるアンサンブル平均した速度変動 \tilde{u} , \tilde{w} のベクトルと温度変動のコンター。10.3mの高さのデータは点線の矢印で示す。点線および実線は、各々温度変動が平均値以下の値と平均値以上の値を0.05°C刻みで表示した。

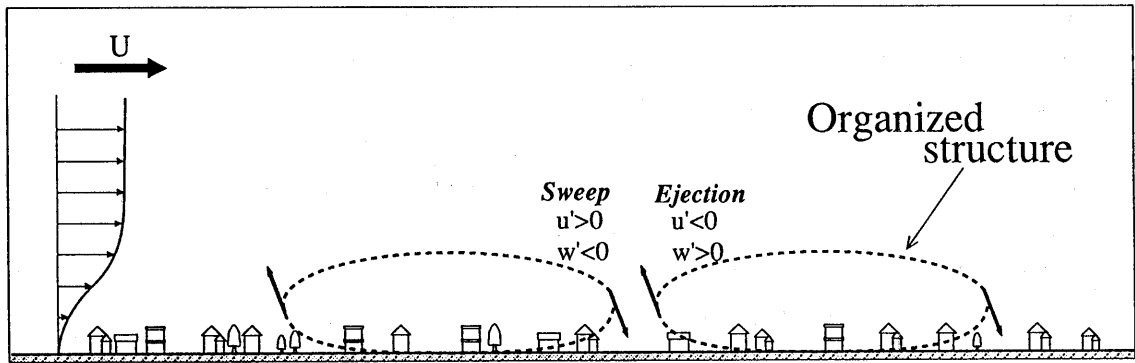


図10 都市キャノピー上の組織運動の概念図

壊する傾向にあると Oke²⁶⁾ が説明している。本観測において、キャノピー層の上の気は、不安定状態か ($z'/L = -0.97$ at $z = 45\text{m}$)、やや不安定状態にある ($z'/L = -0.23$ at $z = 18\text{m}$)。一方、キャノピー層の近傍の気は中立に近い ($z'/L = -0.05$ at $z = 5.4\text{m}$)。高さが減少するに従い、不安定な状態が弱くなるのは、上に述べた組織運動によるもので、また、都市キャノピー層内において、日中強い温度勾配が破壊されるメカニズムは組織運動による機械的な混合そのものである。

5. まとめ

札幌市の都市郊外において乱流観測を行い、都市キャノピー内外にわたる広い範囲での乱流統計性質及び組織運動の鉛直特性を明らかにした。その結果を以下のようにまとめる。

- 1) 都市キャノピー近傍において、主流方向の変動風速の標準偏差 σ_u の分布はキャノピー上でブロードなピークを持ち、一方、主流と直角となる方向の変動風速の標準偏差 σ_v と鉛直方向の変動風速の標準偏差 σ_w はほぼ均一な分布を示す。また、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の垂直分布は、キャノピー高さの1.5倍のところに弱いピークをもち、それ以上の高度でゆっくりと減少する。
- 2) 都市キャノピー近傍における組織運動の鉛直特性を調べるために、4象限解析法を用いた。その結果、キャノピー近傍に形成されている高レイノルズ応力の層は sweep および ejection 運動によって作られていることが明らかにされた。また、これらの組織運動の上限がキャ

ノピー平均高さ 3~4 倍のところに存在することが分かった。

- 3) 都市キャノピー近傍における温度の ramp 現象及びそれを発生する流れ場の構造をアンサンブル平均法により調べた。その結果、温度 ramp の通過に伴う温度の上昇と下降は 2 次元性の持つ ejection と sweep 運動によってつくられることが明らかにされた。また、都市キャノピー近傍に存在するこれらの組織運動が、正の熱フラックスを作り、結果的にキャノピー内外の温度場を均一化する働きをしていることが分かった。都市キャノピー層内において日中強い温度勾配が破壊されるメカニズムは組織運動による機械的な混合そのものと説明される。

謝 辞

本観測は、国立環境研究所都市大気保全研究チーム総合研究官若松伸司博士、主任研究員上原清氏および大気物理研究室長鶴野伊津志博士と共同で実施した。種々のご協力に感謝致します。また、北海道工業大学建築工学科苫米地助教授には現地の観測に際し、観測場所などいろいろなご協力を頂き深くお礼を申し上げます。

引用文献

- 1) T. R. Oke: The distinction between canopy and houndary-layer urban heat island, Atmosphere 14 (1976) 269-277.
- 2) M. R. Raupach, A. S. Thom & I. Edwards: A wind-tunnel study of turbulent flow close to regularly arranged rough surfaces, Boundary-

- Layer Meteorol. **18** (1980) 373-397.
- 3) I. J. Graham: An analysis of turbulence statistics at fort wayne, Indiana, J. Applied Meteorol. **7** (1968) 90-93.
 - 4) N. E. Bowne & J. T. Ball: Observational comparison of rural and urban boundary layer turbulence, J. applied Meteorology **9** (1970) 862-873.
 - 5) R. R. Brook: the measurement of turbulence in a city environment, J. Applied Meteorol. **11** (1972) 443-450.
 - 6) P. S. Jackson: Wind Structure Near a City Center, Boundary-Layer Meteorol. **15** (1978) 323-340.
 - 7) U. Högstrom, H. Bergström & H. Alexandersson: Turbulence characteristics in a near neutrally stratified urban atmosphere, Boundary-Layer Meteorol. **23** (1982) 449-472.
 - 8) J. F. Clarke, J. K. S. Ching & J. M. Godowich: An experimental study of turbulence in an urban environment, EPA technical report EPA-600/3-82-062 (1982) 167pp.
 - 9) I. Uno, S. Wakamatsu, H. Ueda & A. Nakamura: An observational study of the structure of the nocturnal urban boundary layer, boundary-Layer Meteorol. **45** (1988) 59-82.
 - 10) M. W. Rotach: Turbulence within and above urban canopy, *ETH Technical Report* 45 (Geogra. Inst. E. T. H., Zurich, 1991) 245pp.
 - 11) M. W. Rotach: Turbulence close to a rough urban surface. Part I ; Reynolds stress, Boundary-Layer Meteorol. **65** (1993) 1-28.
 - 12) M. W. Rotach: Turbulence close to a rough urban surface. Part II: Variances and gradients, Boundary-Layer Meteorol. **66** (1993) 75-92.
 - 13) M. Roth & T. R. Oke: Turbulent transfer relationships over an urban surface. I: Spectral characteristics, Quart. J. Royal Meteorol. Soc. **119** (1993) 1071-1104.
 - 14) M. Roth: Turbulent transfer relationships over an urban surface. II: Integral statistics, Quart. J. Royal Meteorol. Soc. **119** (1993) 1105-1120.
 - 15) Y. Ogawa & T. Ohara: Observation of the turbulent structure in the Planetary boundary layer with a kytoon-mounted ultrasonic anemometer system, Boundary-Layer Meteorol. **22** (1982) 23-131.
 - 16) J. Counihan: Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and density of three-dimensional roughness elements, Atmos. Environ. **5** (1971) 637-642.
 - 17) H. Lettau: Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basic of roughness-element description, J. Applied Meteorol. **8** (1969) 828-832.
 - 18) M. R. Raupach: Stand overstorey processes, Phil. Trans. R. Soc. Lond. B **324** (1989) 175-190.
 - 19) H. A. Panofsky & J. A. Dutton: *Atmospheric turbulence* (J. Wiley, New York, 1984) 397pp.
 - 20) M. R. Raupach: Conditional statistics of Reynolds stress in rough-wall and smooth-Wall turbulent boundary layer, J. Fluid Mech. **108** (1981) 363-382.
 - 21) M. R. Raupach, J. J. Finnigan & Y. Brunet: Coherent eddies in vegetation canopies, *Proc. Fourth Australasian Conf. on Heat and Mass Transfer* (Christchurch, New Zealand, 1989) 75-90.
 - 22) H. Bergström & U. Högstrom: Turbulent exchange above a pine forest. II Organized structures, Boundary-Layer Meteorol. **49** (1989) 231-263.
 - 23) W. Gao, R. H. Shaw & U. K. T. Paw: Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy, Boundary-Layer Meteorol. **47** (1989) 349-377.
 - 24) W. C. Reynolds & A. K. M. F. Hussain: The mechanics of an organized wave in turbulent shear flow. Part 3. Theoretical models and comparisons with experiments, J. Fluid Mech. **54** (1972) 263-288.
 - 25) M. Kanda & M. Hino: Organized structures developing turbulent Flow within and above a plant canopy, using a large eddy simulation, Boundary-Layer Meteorol. **68** (1994) 237-257.
 - 26) T. R. Oke: *Boundary Layer Climates* (Routledge, 1987) 435pp.