

## 都市の接地境界層における乱流相似関数について

神 田 学\*・森 脇 亮\*・鈴 木 讓\*

マティアス ロート\*\*・ティム オーク\*\*\*

### 要 旨

地表面被覆の幾何構造が異なる世田谷・銀座・バンクーバーの3都市のコンスタントフラックス層において超音波風速温度計によって計測された乱流データに基づき、それらの乱流統計量に関して考察がなされた。草原上の観測から得られた既存の相似関数と比較検討し、以下の結果を得た。(1) 運動量に対する熱の鉛直輸送効率を表すそれぞれの乱流相関係数の比は、大気安定度パラメーターに対して3都市ともほぼ同一の関数で表現されるが、草原上で得られた既存の相似関数と比べて全般に値が小さい。都市では建物の Wake 効果あるいは熱源の空間的非均一性により、運動量の熱に対する相対的な交換効率が草原上よりも高いことが示唆された。(2) 主流方向風速の標準偏差、温度の標準偏差、乱流運動エネルギー散逸率、および温度分散の散逸率の4つの無次元乱流統計量について、本論で対象とした都市のコンスタントフラックス層で成立する相似関数式が試算された。

### 1. はじめに

様々な幾何形状を有した建築物の存在により、都市の接地境界層内の放射過程や乱流過程は非常に複雑である。その実態解明さらにはそのモデル化は、都市域の大気環境研究の重要な課題の1つとなっている。

都市の接地境界層は、乱流構造の特徴から3つの層に分けることが出来る(第1図)。最下層には地物の影響を直接的に受けるキャノピー層(Canopy Layer)があり、その上には遷移層(Roughness Sublayer)、コンスタントフラックス層(Constant Flux Layer, 以下CFL)が続いている。接地境界層は大気境界層の底部約10%であると言われている。キャノピー層内の乱流は3次的に複雑な挙動を示すが、CFL内の乱流は統計的には鉛直1次元のスケーリング、いわゆるモニン・オブコフ相似則(以下MOS)を満たしている。

風工学や建築分野においては、キャノピー層内の微

細な乱流構造が研究されているが(例えば、Oikawa and Meng, 1995)、気象分野においては都市のCFLにおける乱流特性の理解が望まれる。

これまで、MOSに基づいた乱流相似関数が数多く提案されてきた。しかし、そのほとんどが平坦な草原などで計測された結果から得られたものである(例えば、Wyngaard and Cote, 1971; Panofsky *et al.*, 1977; De Bruin *et al.*, 1993; Kaimal *et al.*, 1972)。Roth and Oke (1995)が、カナダの住宅街における実測データに基づき、都市のCFLでMOSの一部が成立しない可能性を示したように、草原上で得られた既存の相似関数が都市でも利用できる保証はない。にもかかわらず、都市域の熱・水収支を把握するための解析では、乱流計測を伴わないポーエン比法や傾度法などを採用しており、メソスケールモデルによる計算では、既存の相似関数をそのまま使用していることが多い。

都市のCFLでも成立する相似関数を導くには、都市での乱流計測が必要である。しかし、都市での乱流計測データは、裸地、草原あるいは森林でのデータと比べると著しく少ない。これは都市のCFL内での乱流計測が容易ではないことに起因している。CFLとなっている高度は、既存のデータを参照すると少なくとも建物高さの2.5~3倍程度以上と考えられる

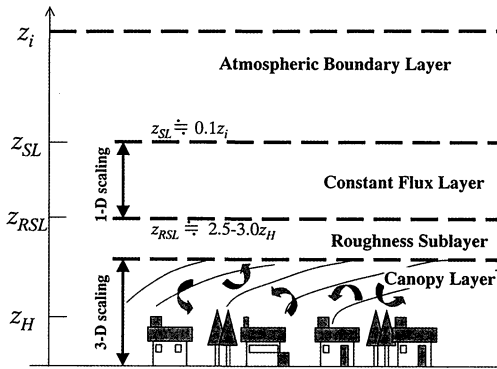
\* 東京工業大学理工学研究科国際開発工学専攻。

\*\* シンガポール・シンガポール大学地理学科。

\*\*\* カナダ・ブリティッシュコロンビア大学地理学科。  
—1999年3月15日受領—  
—2000年4月5日受理—

第1表 世田谷, 銀座およびバンクーバーの諸元.  $z_s$ : 測定高さ,  $z_H$ : 建物高さ,  $\lambda_p (=A_p/A_T)$ : 平面面積指標 (建蔽率),  $A_p$ : 建物の平面面積,  $A_T$ : 総平面面積,  $\lambda_f (=A_f/A_T)$ : 前面面積指標,  $A_f$ : 風に対する建物の前面面積,  $A_T$ : 総平面面積,  $z_o$ : 流体力学的粗度,  $z_d$ : ゼロ面変位.

Site	Land cover	$z_s$ (m)	$z_H$ (m)	$\lambda_p$	$\lambda_f$	$z_o$ (m)	$z_d$ (m)	Observation period	References
Setagaya	residential	34.5	8.5	0.61	0.55	0.16	7.0	4-11 Oct. 1998	Kanda et al. (1999)
Ginza	commercial	63.5	28.0	0.60	0.62	1.19	30.3	18-22 Aug. 1996	Kanda et al. (1997)
Vancouver	residential	22.5	8.5	0.36	0.18	0.60	4.5	5-15 Jul. 1989	Roth and Oke (1993,1995)



第1図 都市の接地境界層の概念図.

(Roth, 2000). したがって, 建物の平均高さが10 m程度の住宅街の場合, 25 m~30 m以上の高度に測器を設置する環境が整っていないなければならない. また, 粗面上の乱流境界層厚さはフェッチ (風上距離) の1/10~1/100のオーダーであるから (日野, 1992), 20~30 m以上に内部境界層が発達するには, 1 km近いフェッチが必要となる. しかし, このような広い範囲にわたって, 均一な建物高さや配列が維持されている一様な都市域・住宅域はほとんどない.

幸い, これらの条件をほぼ満たす3つの都市 (世田谷, 銀座およびバンクーバー) で乱流観測を実施することが出来た (神田ほか, 1997; Roth and Oke, 1993, 1995). 本研究の目的は, 計測された乱流データから得た乱流統計量を既存の相似関数と比較検討し, 都市のCFLにおける乱流特性を把握することである.

## 2. 観測場所の諸元

解析の対象となる3つの観測場所の諸元を第1表にまとめた. 流体力学的粗度およびゼロ面変位は, 幾何形状パラメータを用いた Macdonald *et al.* (1998)

の方法にならって算出した. 世田谷は典型的な日本の密集低層住宅街であるが, 同じ低層住宅街であるバンクーバーと比較し, 建蔽率などから判断して密集度が高い. 銀座は商業都市であり, 他の2都市に比べて建物高さが高ただけでなく, 夏季の観測データであるため人工排熱の影響が無視できないくらい大きいことに留意しなければならない.

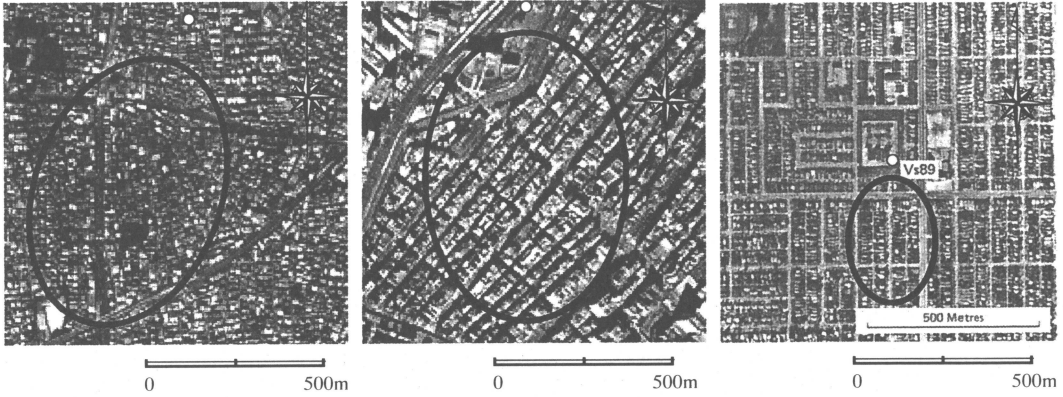
第2図に, 3都市の航空写真とソースエリアの一例を示す. ソースエリアとは, 観測点に影響を及ぼす地表面領域のことであり, 移流拡散を考慮した逆ラジエクトリー手法で特定され, 点計測データの空間代表性の目安となる (Schmid, 1994). ソースエリアは大気安定度などの気象条件だけでなく, 観測高度によっても変化する. 第2図のソースエリアは, 典型的な風向と弱不安定条件のもとで20 m以上の十分高い観測点に対して得られたものである. このソースエリアは数100 m~1 kmの範囲に及び, 複数の街区を含んでいるが, その中ではほぼ均一な建物配列が成立している. 以下の解析では, 1高度 (1点) での超音波風速温度計 (いずれも (株)カিজョー) の観測データを使用して乱流特性が議論されるが, 点計測データといえどもソースエリアスケールの空間代表性を有している.

## 3. 乱流統計量と既存の相似関数式

解析に用いる乱流データは, CFL内の1高度に設置された超音波風速温度計で計測された. サンプルング周波数は10 Hz, 乱流平均化時間は30分である. 1高度での観測データから算出可能な乱流統計量だけが検討の対象となる. また安定時のデータは, 世田谷においてわずかに取得されたのみであるので, 中立から不安定時にしぼって議論を進める.

### 3.1 運動量と熱の相対的な鉛直輸送効率

運動量と熱の相対的な鉛直輸送効率は, 多くのモデルで底面境界条件として考慮されるため, CFLの乱流特性の中でも特に重要な物理量である. これは速度と



第2図 3都市の航空写真とソースエリアの一例。左：世田谷，中央：銀座，右：パンクーパー，図中の楕円：ソースエリア，白丸：測定点。

温度の鉛直勾配関数や拡散係数から直接もとめることができるが<sup>3)</sup>，そのためには2高度以上での物理量の計測値が必要である。ここでは，Roth and Oke (1995) にならない，運動量と熱の鉛直輸送に関わる以下の乱流相関係数を用いて，それらの特性を調べてみることにする。

$$r_{uw} = \overline{u'w'} / \sigma_u \sigma_w \quad (1)$$

$$r_{Tw} = \overline{T'w'} / \sigma_T \sigma_w \quad (2)$$

ここで， $u, w$  はそれぞれ風速の主流方向成分と鉛直成分， $T$  は気流温度， $\sigma$  は標準偏差である。プライムは時間平均値（上付きバーで示される）からの瞬間的な偏差を示している。式(2)中の気流温度には超音波風速温度計の出力を用いているため，厳密には水蒸気量による補正が必要であるが，ここでは行っていない。以上の相関係数は，それぞれ運動量と熱の鉛直輸送効率の尺度と見なすことが出来，その絶対値は0（相関なし）～1（最も効率的な輸送）までの値をとる。運動量と熱の相対的な鉛直輸送効率を調べるためには，以下のように2つの相関係数の比をとればよい。

$$\frac{r_{Tw}}{r_{uw}} = -\frac{u_* T_* \sigma_u \sigma_w}{\sigma_T \sigma_w u_* u_*} = \frac{\sigma_u / u_*}{\sigma_T / T_*} = \frac{\phi_u}{\phi_T} \quad (3)$$

ここで， $u_*$ ， $T_*$  は，それぞれ摩擦速度，摩擦温度を， $\phi$  はそれらで無次元化した乱流標準偏差を与える。式(3)より，運動量に対する熱の鉛直輸送効率は，主流方向風速と温度の無次元化された乱流標準偏差の比に帰着される。不安定時における乱流標準偏差の既存の相似関数式の一例を以下に示す。

$$\phi_u = \frac{\sigma_u}{u_*} = 2.2(1 - 3z'/L)^{1/3} \quad (4)$$

$$\phi_T = -\frac{\sigma_T}{T_*} = 0.95(-z'/L)^{-1/3} \quad (5)$$

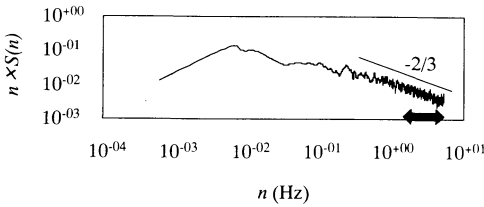
ここで， $z' (= z - z_d)$  はゼロ面変位  $z_d$  より測った高度， $L = -u_*^3 \overline{T} / g k w' T'$  はモニン・オブコフ長さ， $\overline{T}$  は平均気温， $g$  は重力加速度， $k$  はカルマン定数(0.4)である。式(4)，式(5)は，それぞれ De Bruin *et al.* (1993)，Wyngaard and Cote (1971) によって，いずれも草原での観測から得られたものである。草原上における(5)式の適用性については一般的な意見の一致が見られるところであるが， $\phi_u$ については統計処理の方法などによって多少のばらつきがある（例えば，竹内・近藤(1981)に詳しい）。

### 3.2 無次元エネルギー散逸率

乱流運動エネルギー散逸率（以下  $\epsilon$ ）は， $K-\epsilon$  モデルなどの乱流モデルにおいて不可欠な物理量である。また，シンチロメーターと呼ばれる新しい顕熱測定機器では，その算定手法 (Thiermann and Grassl, 1992) に， $\epsilon$  の相似関数の使用を前提としている。 $\epsilon$  は風速のスペクトルから算出可能である。慣性小領域におけるコルモゴロフの第2定理と，テラーの凍結乱流仮説により，風速成分の1次元スペクトル  $nS_u(n)$  は，次の様に表せる（例えば，Champagne *et al.*, 1977）。

$$nS_u(n) = A_1 \epsilon^{-1/3} (2\pi n/U)^{-2/3} \quad (6)$$

ここで， $n$  は周波数， $U$  は平均スカラー風速， $A_1$  はコルモゴロフ定数で0.5 (Panofsky and Dutton, 1984) を表す。同様に，温度の1次元スペクトル  $nS_T(n)$  は，



第3図 世田谷における主流方向風速成分 ( $u$ ) のスペクトルの一例 (15:16-15:45, 10 Oct.). 矢印は  $nS(n)$  が  $n$  の  $-2/3$  乗に比例する範囲を示す。

次のように表せる。

$$nS_T(n) = B_1 \epsilon^{-1/3} N^* (2\pi n/U)^{-2/3} \quad (7)$$

ここで、 $B_1$  は普遍定数で0.78、 $N^*$  は温度分散の散逸率である。第3図に、世田谷における主流方向風速成分 ( $u$ ) のスペクトルの例を示す。スペクトルが  $n$  の  $-2/3$  乗に比例する慣性小領域 ( $2 < n < 5$ ， 図中矢印部分) から周波数とスペクトル密度を読みとり、式(6)を使って  $\epsilon$  を逆算することが出来る。無次元化されたエネルギー散逸率 (以下  $\phi_\epsilon$ ) と、無次元化された温度分散の散逸率 (以下  $\phi_N$ ) は以下で定義される。

$$\phi_\epsilon = \epsilon k z' / u_*^3 \quad (8)$$

$$\phi_N = N^* k z' / u_* T_*^2 \quad (9)$$

Wyngaard and Cote (1971), Kaimal *et al.* (1972) はカンザスデータに基づいて不安定時の  $\phi_\epsilon$ 、 $\phi_N$  に対する次のような実験式を提案した。

$$\phi_\epsilon = [1 + 0.5(-z'/L)^{2/3}]^{3/2} \quad (10)$$

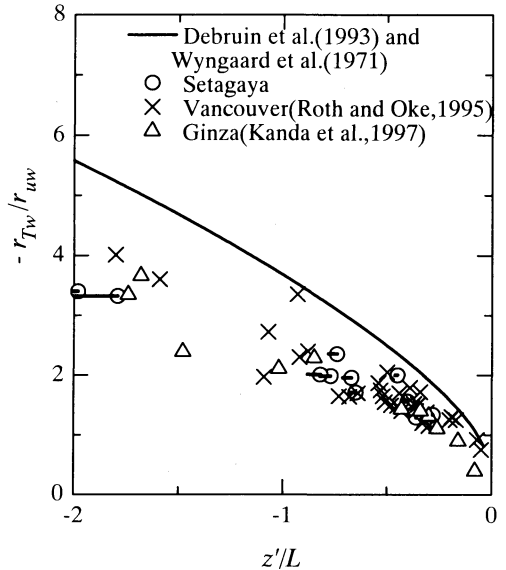
$$\phi_N = 0.74(1 - 9z'/L)^{-1/2} \quad (11)$$

Clarke *et al.* (1982) は都市域の無次元散逸率について検討しているが、その実験式は記さなかった。

#### 4. 結果と考察

##### 4.1 運動量と熱の相対的な鉛直輸送効率

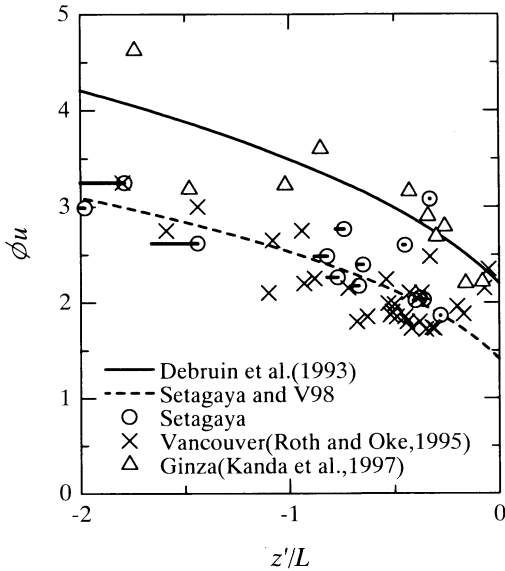
第4図に、大気安定度パラメーターに対する、運動量と熱の相対的な鉛直輸送効率 (乱流相関係数の比、式(3))を示す。ただし、世田谷のデータについては別途シンチロメーターを用いたゼロ面変位の推定誤差が検討されているので(神田ほか, 1999)、その知見に基づいた誤差範囲もプロットされている (各データ中の横バー)。ゼロ面変位の推定誤差は、大気が不安定な



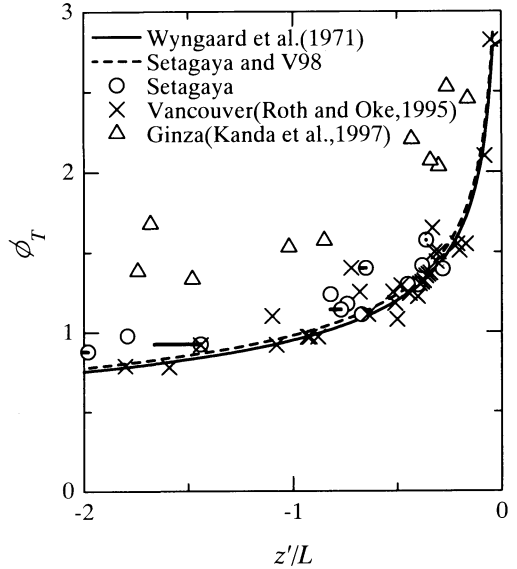
第4図 大気安定度パラメーター ( $z'/L$ ) に対する運動量と熱の乱流相関係数の比 ( $-r_{Tw}/r_{uw}$ )。

ほど効いてくるが、結果の定性的傾向を左右するほど大きくないことがわかる。MOSによると運動量と熱の乱流相関係数の比は、CFL内において大気安定度パラメーターの一価の関数となることが期待される。確かに、異なる3つの都市(世田谷・銀座・バンクーバー)の全てのデータがほぼ同一の関数で表すことが出来る。しかし、De Bruin *et al.* (1993) および Wyngaard and Cote (1971) の相似関数よりも小さくなっている。このことは都市の接地境界層においては、De Bruin *et al.* (1993) および Wyngaard and Cote (1971) の相似関数で予測される以上に、運動量の熱に対する相対的な交換効率が低いことを示唆している。これらの乱流統計量は観測者・統計処理方法などによっても多少のばらつきをもつので解釈には注意を要するが、De Bruin *et al.* (1993) および Wyngaard and Cote (1971) の相似関数が草原上での観測から得られていることを考えれば、都市の接地境界層で同じ関数が成り立たない可能性は十分あり得るだろう。都市の接地境界層の気象学的モデルに既存の相似関数を用いる場合には、このことに留意しなければならない。

都市と草原の間に差が現れる原因をより詳しく調べるため、第5図、第6図にそれぞれ、大気安定度パラ



第5図 大気安定度パラメーター ( $z'/L$ ) に対する無次元化された速度標準偏差 ( $\phi_u$ )。



第6図 大気安定度パラメーター ( $z'/L$ ) に対する無次元化された温度標準偏差 ( $\phi_T$ )。

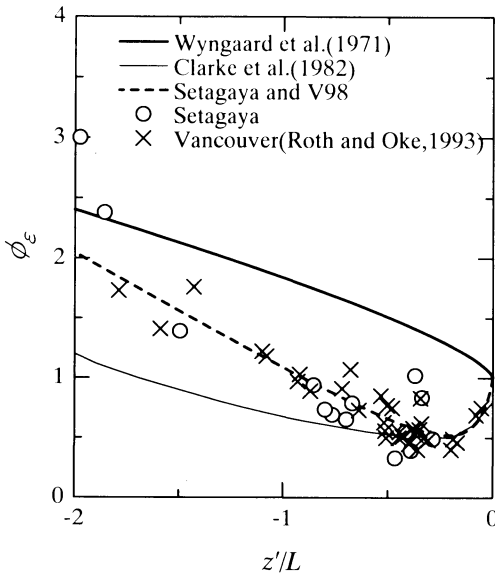
メーターに対する無次元化された速度標準偏差 ( $\phi_u$ )、無次元化された温度標準偏差 ( $\phi_T$ ) を示す。住宅街である世田谷およびバンクーバーでの無次元標準偏差は速度だけでなく温度についても、大気安定度パラメーターに対してほぼ同一の変化傾向を示している。De Bruin *et al.* (1993) および Wyngaard and Cote (1971) の相似関数と比較すると、 $\phi_T$  はほぼ一致しているのに対し、 $\phi_u$  はそれよりも小さい。この原因として、都市では都市キャノピー層内の建物が作り出す Wake による形状抵抗が表面摩擦の効果よりも卓越し、平坦な草地に比べて運動量の相対的な交換効率が向上していることが考えられる。 $\phi_T$  に Wyngaard and Cote (1971) の相似関数との差がほとんど現れないのは、Wake による効果は運動量に比べてスカラー輸送にはあまり有効に寄与しないからであろう (Thom, 1972)。

一方、大商業都市である銀座だけは他の2都市とかなり異なる傾向を示している。 $\phi_u$  は De Bruin *et al.* (1993) の相似関数とほぼ同じ程度であるが、 $\phi_T$  は Wyngaard and Cote (1971) の相似関数より大きくなっている。これは、草原のデータと比べ、運動量輸送効率の向上は見られず、温度輸送効率が低下していることを意味している。 $\phi_T$  が Wyngaard and Cote (1971) の相似関数より著しく大きくなる原因として、地表面における人工的な熱源が関係していることが第

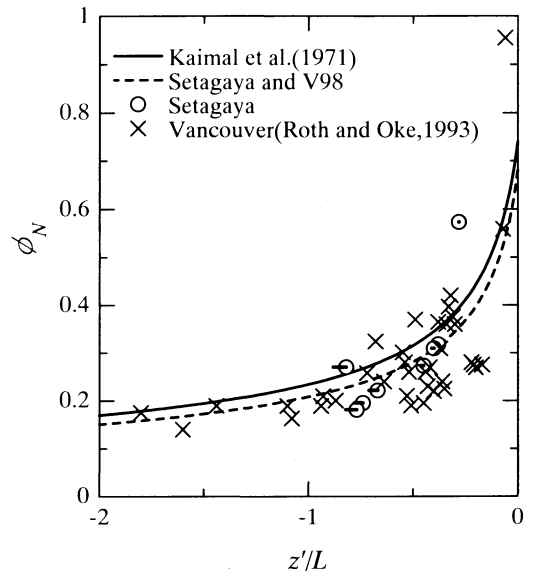
1に考えられる。夏季の銀座における熱収支の実測によれば、自然起因の顕熱に匹敵する人工的な顕熱と潜熱が都市の消費活動や冷房機器の使用によって排出されている (神田ほか, 1997)。ところが、世田谷やバンクーバーでの人工排熱は無視しうるものであった。人工的な熱源の空間分布は、太陽エネルギーによってもたらされる顕熱の自然な空間分布 (例えば日向・日陰などの差異) に比べて非一様性が大きいと予想される。空間的な熱源の「むら」は  $\phi_T$  を増大させ、実質的な熱輸送効率を低下させる原因となりうる。一方、 $\phi_u$  については、銀座においても前述した建物の Wake の効果が期待されるが、運動量輸送には反映されていない。残念ながら、この原因は特定できていない。銀座は建蔽率が高い割には、かなり広い幹線道路が存在するため、そこが風道となって Wake の効果が働きにくかったことが1つ考えられる。また、キャノピー層内外において、不均一に放出される人工廃熱に対応した大きなサーマルによる運動量輸送が支配的で形状抵抗の影響が現れにくかったことも考えられる。本データだけでは原因を特定することは出来ず、さらに様々な都市において様々な条件の下で実測データを蓄積する必要がある。

#### 4.2 無次元エネルギー散逸率

第7図に無次元エネルギー散逸率 ( $\phi_e$ ) を大気安定



第7図 大気安定度パラメーター ( $z'/L$ ) に対する無次元エネルギー散逸率 ( $\phi_\epsilon$ )。



第8図 大気安定度パラメーター ( $z'/L$ ) に対する無次元温度分散散逸率 ( $\phi_N$ )。

度パラメーターの関数で示す。世田谷・バンクーバーのデータはほぼ同一の曲線上に並んでいる。中立に近い状態では、世田谷・バンクーバーのデータは、カンザスの観測値から得られた Wyngaard and Cote (1971) の相似関数よりも小さくなっているが、郊外住宅地で得られた Clarke *et al.* (1982) の結果とは良く一致している。大気が不安定になるにつれ、本観測データは Clarke *et al.* (1982) より大きくなりカンザスデータに近づいていく。前項の  $\phi_u$  と  $\phi_T$  に関する考察で述べたように、大気が中立から不安定状態にある場合、都市では建物の存在により形成される大きな Wake が、局所性の強い乱流運動エネルギー (TKE) の生成を行っている。その結果、草原の場合と比べ、局所的な  $\phi_\epsilon$  に対する局所的エネルギー生産率の比を相対的に増加させる。

第8図に無次元温度分散の散逸率 ( $\phi_N$ ) を大気安定度パラメーターの関数で示す。本観測データは、カンザスデータと比べやや小さめの傾向があるが、 $\phi_\epsilon$  ほど顕著な違いは見られない。これは  $\phi_T$  の場合と同様、Wake による効果が運動量の場合ほど顕著でないことによる。

5. 都市の接地境界層における相似関数の実験式

実用的な見地から、本論文で取り上げた乱流統計量

の都市の接地境界層における相似関数の実験式を導いておく。パラメーターの同定に当たっては、非線形最小2乗法の1つであるマルカット法 (Nakagawa and Oyanagi, 1980) を用いた。ただし、人工排熱などの影響を受けていない、バンクーバーと世田谷のデータだけを用いた結果について記す。というのは、銀座のデータからはエネルギー消費活動の有無や分布形態によって相似関数に変化することが示唆されるからである。以下に示す相似関数の実験式を、第5図～第8図中の破線で示した。これらの実験式は、その他多くの都市域においてその適用性が検証されなければならないが、より汎用的な実験式を得るための第1歩になると期待される。

$$\phi_u = 1.41(1 - 4.78z'/L)^{1/3} \tag{12}$$

$$\phi_T = 0.98(-z'/L)^{-1/3} \tag{13}$$

$$\phi_\epsilon = (1 - 10.5z'/L)^{-1} - z'/L \tag{14}$$

$$\phi_N = 0.68(1 - 9.69z'/L)^{-1/2} \tag{15}$$

6. 議論

都市の CFL における乱流相似関数について既存の相似関数との違いを中心に考察を進めてきた。しかし、本来 MOS によれば、CFL では、乱流統計量は地表面性状に依存しないはずであり、「普遍」的な関数が成立

しなくてはならない。この矛盾について検討する。まず、今回観測を行った都市を含め、実際の都市域について CFL が成立し得るのか、という点である。CFL の存在条件は、数学的には、以下のような  $z$  が存在することである (第 1 図参照)。

$$z_{RSL} < z < z_{SL} \quad (16)$$

ここで、 $z_{RSL}$  は遷移層の高さ、 $z_{SL}$  は接地境界層の高さ、である。接地境界層の高さ  $z_{SL}$  は、大気境界層 ( $z_i$ ) の 10% 程度と言われており、本観測期間中はいずれの都市でも混合層高度が 500 m ~ 1 km であったので、 $z_{SL}$  は 50 m ~ 100 m と考えられる。 $z_{RSL}$  については非常に多くの議論があるが、Roth (2000) が 15 都市における乱流データを整理したところ、地表面からの高さが平均建物高さ  $z_H$  の 2.5 ~ 3 倍以上になると、速度標準偏差などが文字通り高さによらず一定となり、CFL の存在条件を満たすとしている。これに従うと、バンクーバー・世田谷はいずれも  $z_{RSL}$  が 20 ~ 30 m 程度となり、銀座は 70 m 程度となる。バンクーバー・世田谷は、層厚が狭いものの式 (16) の成立条件を満たしており、銀座についてはかなり微妙で CFL が存在し得なかった可能性も否定できない。いずれにしろ、粗度高さの高い都市域については CFL が存在し得るが狭い範囲に限られると言える。これと同様の議論は Rotach (1999) によっても行われている。

本論の観測データが CFL 内で測定されたと判断した根拠は、Roth (2000) の判定基準による。すなわち、本観測で用いた 3 都市の中立時の無次元水平速度標準偏差がいずれも 2.25 ~ 2.28 の範囲にあり、これは Roth (2000) が 15 都市の CFL に共通に見られるとしている無次元標準偏差の値と一致しているからである (遷移層では無次元速度標準偏差が高度とともに減少する)。重要な点は、本論および Roth (2000) における  $z > (2.5 \sim 3) z_H$  の範囲において、(1) 建物の幾何パラメーターや高さに依存しない一定の無次元速度標準偏差が存在し、(2) それでいて、いくつかの乱流量については既存の相似関数から系統的にずれている、といった相似関数の「普遍性」について相反する事実が存在することである。

CFL における「普遍」関数の存在に疑問を呈する実測データは、都市の接地境界層以外にも報告例がある。例えば、Khanna and Brasseur (1997) は Large Eddy Simulation により MOS を詳細に検討し、通常のスケーリングに加えて、大気境界層高さ  $z_i$  そのものをパ

ラメーター化する必要があると主張している。Fairall *et al.* (1980) は、波浪時の海上 CFL における湿度の相似関数が平地のそれと異なっており、しぶき飛散をパラメーター化する必要があると主張している。Denmead and Bradley (1985) は、森林上 CFL における温度や湿度の相似関数が平地のものとは異なることを指摘し、森林キャノピー特有の乱流構造に起因したものではないかと主張している。森林や都市のような大粗度上の接地境界層における乱流は、壁面乱流よりは平均風速分布に変曲点を持つ自由せん断乱流とのアナロジーも指摘され (例えば、Kanda and Hino, 1994; Raupach *et al.*, 1996)、それが平坦な裸地面との相似関数の違いに影響していると説明する説もある (Raupach *et al.*, 1996; Roth, 2000)。これらの事例はいずれも、従来の MOS では想定されていない、境界層内部や地表面近傍のダイナミクスを考慮しないと観測 (計算) データを説明できないとしている点で共通している。

## 7. まとめ

都市の地表面被覆状態は複雑であるため、都市の接地境界層での乱流特性は草原上のものとは異なることが指摘されている (例えば、Roth and Oke, 1995)。都市の CFL で得られた乱流統計量を既存の相似関数と比較検討し、都市の接地境界層における乱流の特徴を調べた。乱流観測が行われた都市は世田谷、銀座およびバンクーバーの 3 都市で、乱流データは超音波風速温度計を用いて収集された。これら 3 都市は、互いに地表面被覆の幾何形状は異なるが、1 km 以上にわたってほぼ均一な建物高さや配置が維持されている。主要な結論は以下の通りである。

(1) 運動量に対する熱の鉛直輸送効率を表すそれぞれの乱流相関係数の比は、大気安定度パラメーターに対して 3 都市ともほぼ同一の関数で表現されるが、草原の観測から得られた De Bruin *et al.* (1993) および Wyngaard and Cote (1971) の相似関数と比べて全般に値が小さい。都市では建物の Wake 効果あるいは熱源の空間的非均一性により、運動量の熱に対する相対的な交換効率が草原上よりも高いことが示唆された。

(2) 主流方向風速の標準偏差、温度の標準偏差、乱流運動エネルギー散逸率、および温度分散の散逸率の 4 つの無次元乱流統計量についてバンクーバーおよび世田谷のコンスタントフラックス層で成立する相似関数式が試算された。

## 謝 辞

植田洋匡教授(京都大学防災研究所), 中村泰人教授(熊本県立大学環境共生学部), 鶴野伊津志教授(九州大学応用力学研究所)には有益な助言と多くの技術的援助を受けました。また, 科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業(代表: 久保幸夫慶応義塾大学教授)の資金的援助を受けました。ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- Champagne, F. H., C. A. Friehe, J. C. Larue and J. C. Wyngaard, 1977: Flux measurements, flux estimation techniques and fine-scale turbulence measurements in the unstable surface layer over land, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 515-530.
- Clarke, J. F., J. K. S. Ching and J. M. Godowitch, 1982: An Experimental Study in an Urban Environment, Tech. Rep., U. S. E. P. A., Research Triangle Park, NMS PB82-226085, 167pp.
- De Bruin, H. A. R., W. Kohsiek and J. J. M. Van Den Hurk, 1993: A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat, and water vapor using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities, *Bound.-Layer Meteor.*, **63**, 231-257.
- Denmead, O. T. and E. F. Bradley, 1985: Flux-gradient relationships in a forest canopy. *The Forest-Atmosphere Interaction*, D. Reidel Pub. 350pp.
- Fairall, C. W., G. E. Schacher and K. L. Davidson, 1980: Measurement of the humidity structure function parameters,  $C_q^2$  and  $C_{Tq}$ , over the Ocean, *Bound.-Layer Meteor.*, **19**, 81-92.
- 日野幹雄, 1992: 流体力学, 朝倉書店, 469pp.
- Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and O. R. Cote, 1972: Spectral characteristics of surface-layer turbulence, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **98**, 563-589.
- Kanda, M. and M. Hino, 1994: Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using a Large Eddy Simulation, *Bound.-Layer Meteor.*, **68**, 237-257.
- 神田 学, 高柳百合子, 横山 仁, 森脇 亮, 1997: 銀座オフィスビル街における熱収支の特性, *水文・水資源学会誌*, **10**, 329-336.
- 神田 学, 森脇 亮, 鈴木 譲, マティアス ロート, ティム オーク, 1999: 住宅街の接地境界層における乱流フラックスの実測—シンチロメーターの利用—, *天気*, **47**, 453-462.
- Khanna, S. and J. G. Brasseur, 1997: Analysis of Monin-Obukhov similarity from large-eddy simulation, *J. Fluid Mech.*, **345**, 251-286.
- Macdonald, R. W., R. F. Griffiths and D. J. Hall, 1998: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, **32**, 1857-1864.
- Nakagawa T. and Y. Oyanagi, 1980: "Program System SALS for Nonlinear Least-Squares Fitting in Experimental Sciences" in *Recent Developments in Statistical Inference and Data Analysis*, North Holland Publishing Company, 221-225.
- Oikawa, S. and Y. Meng, 1995: Turbulence characteristics and organized motion in a suburban roughness sublayer, *Bound.-Layer Meteor.*, **74**, 289-312.
- Panofsky, H. A., H. Tennekes, D. H. Lenschow and J. C. Wyngaard, 1977: The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under unstable conditions, *Bound.-Layer Meteor.*, **11**, 355-361.
- Panofsky, H. A. and J. A. Dutton, 1984: *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications*, John Wiley and Sons, New York, 397pp.
- Raupach, M. R., J. J. Finnigan and Y. Brunet, 1996: Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy, *Bound.-Layer Meteor.*, **78**, 351-382.
- Rotach, M. W., 1999: On the influence of the urban roughness sublayer on the turbulence and dispersion, *Atmos. Environ.*, **33**, 4001-4008.
- Roth, M., 2000: Review of atmospheric turbulence over cities, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* (in press)
- Roth, M. and T. R. Oke, 1993: Turbulent transfer relationships over an urban surface. 1: Spectral characteristics, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 1071-1104.
- Roth, M. and T. R. Oke, 1995: Relative efficiencies of turbulent transfer of heat, mass, and momentum over a patchy urban surface, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1863-1874.
- Schmid, H. P., 1994: Source area for scalars and scalar fluxes, *Bound.-Layer Meteor.*, **67**, 293-318.
- 竹内清秀, 近藤純正, 1981: 地表に近い大気, *大気科学講座 1*, 東京大学出版会, 28-32.
- Thiermann, V. and H. Grassl, 1992: The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation, *Bound.-Layer Meteor.*, **58**, 367-389.
- Thom, A. S., 1972: Momentum, mass and heat



exchange of vegetation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **98**, 124-134.  
Wynngaard, J. C. and O. R. Cote, 1971 : The budgets of

turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 190-201.

---

## Study on Similarity Functions of Turbulent Statistics in Urban Boundary Layers

Manabu Kanda\*<sup>1</sup>, Ryo Moriwaki\*<sup>2</sup>, Jo Suzuki\*<sup>2</sup>,  
Matthias Roth\*<sup>3</sup> and Tim Oke\*<sup>4</sup>

\*<sup>1</sup> (*Corresponding author*) *Department of International Development Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8552, Japan.*  
*e-mail : kanda@fluid.cv.titech.ac.jp*

\*<sup>2</sup> *Department of International Development Engineering, Tokyo Institute of Technology.*

\*<sup>3</sup> *Department of Geography, University of Singapore.*

\*<sup>4</sup> *University of British Columbia.*

(Received 15 March 1999 ; Accepted 5 April 2000)

### Abstract

This study uses observational data from urban sites in Setagaya, Vancouver and Ginza, to investigate the applicability of conventional Monin-Obukhov similarity functions. The following results are obtained ; (1) The ration of linear correlation coefficients of heat and momentum transfer are generally smaller than conventional values in rural sites due to bluff body effect. (2) Non-dimensional form of (a) standard deviations of velocity, (b) standard deviation of temperature, (c) dissipation ration of temperature variances, and (d) dissipation ration of kinetic energy, as a function of stability parameter, are proposed. All of these also show more or less different curves from conventional relationships in rural sites.

---