

都市境界層における風速・温度のシア関数

SHEAR FUNCTIONS OF WIND AND TEMPERATURE IN AN URBAN SURFACE LAYER

森脇 亮¹・神田 学²・木本由花³
Ryo MORIWAKI, Manabu KANDA and Yuka KIMOTO

¹正会員 東京工業大学 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

²正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

³学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

We investigate shear functions for momentum (ϕ_M^{-1}) and heat (ϕ_H^{-1}) and linear correlation coefficients of them ($-r_{uw}$, $|r_{wT}|$) using data acquired over an urban surface layer in Tokyo Japan. Field measurement was conducted on a 29m height tower, 4 times the canopy height of 7.3m. 3D sonic anemometers were installed at 4 heights in the region $1.5z_h < z < 4z_h$ and fine wire thermocouples were mounted at 10 heights from the ground to the top. Main conclusions were obtained as follows. (1) Momentum flux decreases with height. Non-dimensional horizontal wind velocity follows a conventional stratified logarithmic profile when it is scaled by the shear stress extrapolated to the roof top level. However, the locally scaled wind profile fails the agreement. (2) Both of ϕ_M^{-1} and $-r_{uw}$ have the dependency on height and they are enhanced near the canopy due to the ‘bluff body’ effect. (3) At a height of $z/z_h = 2.7$, ϕ_M^{-1} follows the conventional similarity function while $-r_{uw}$ is still larger than a conventional one. The ‘bluff body’ effect appears more significantly in $-r_{uw}$. (4) Both of ϕ_H^{-1} and $|r_{wT}|$ have a good agreement with the conventional function and the dependencies on height are not found. In the case of heat, the conventional similarity theory can be applied to the urban surface layer.

Key Words: Urban boundary layer, Monin-Obukov similarity, Shear function, Linear correlation coefficient, momentum, heat

1. はじめに

シア関数は物理量の勾配とフラックスを結び付ける拡散係数に密接に関係しており、モニソーオブコフ相似則(以下MOS)の中でも最も重要な関数形である。現況のメソ気象モデルでは、都市-大気間の運動量・熱エネルギーの乱流交換のモデル化に、平原における観測に基づいて提案されてきた従来のシア関数をそのまま拡張適用している。しかしながら、都市は凹凸の集合体であるために、乱流輸送のメカニズムが平原や植生キャノピーとは大きく異なることが容易に想像でき、従来のシア関数が都市においても適用できるという保証はない。そのため、都市境界層において実測によりシア関数を確認することはとても重要である。近年、風洞実験やLESモデルなどで建物配列上の対数則分布が確認されはじめている(例えば、Cheng and Castro (2002)¹⁾, Kanda et

al. (2004)²⁾など)。また現地計測による対数則分布の報告例もあるが(例えば、Roth (2000)³⁾)、どれも中立時の場合のみである。実際の都市において熱的な効果を考慮した風速・温度プロファイルの実測例は前報⁴⁾を除いて筆者の知る限り無い。しかし前報では、夏季の数日間に取得された風速・温度・乱流データをもとに、これらの大気安定度依存性について概要を述べたにとどまっていた。本報はその続報にあたるもので、その後に蓄積されたデータをもとに、MOSの中でも最も重要である風速・温度のシア関数について検討する。さらに、運動量・熱の乱流輸送効率と解釈され既往の接地層に対する研究でよく用いられてきた乱流相関係数についても同時に調べ、これらを既往のMOS関数と比較することにより、建物の凹凸で構成される都市キャノピーの運動量および熱の乱流輸送の特性について検討した。建物の存在がこれらの乱流統計量に与える影響についても詳しく検討した。

表-1 都市の幾何および粗度パラメータ

建物高さ	z_H	平均	7.3m
		標準偏差	1.3m
建蔽率	λ_p		47.4%
フロントルエリア	λ_f		47.1%
インデックス			
緑被率			21.9%
運動量粗度	z_0		1.1m
ゼロ面変位	z_d		5.3m

表-2 気象測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	サンプリング周波数・平均化時間・設置高度
風速3成分	超音波風速温度計	8Hz, 平均無し
瞬間気温	Metek, USA-1	29m, 21m
	Kaijo, SAT-550	15m, 11m
気温	極細熱電対 (TypeE, 径0.025mm)	1Hz 10分平均 29, 21, 17, 14, 11, 9, 7, 5, 3m

表-3 大気安定度カテゴリ別のデータ数・大気安定度・摩擦速度・平均風速・顕熱フラックスすべて高度29mの超音波風速計で得られた値を表示した

大気安定度の分類	データ数	z/L		u_* (ms^{-1})		U	H
		平均	範囲	平均	範囲	(ms^{-1})	(Wm^{-2})
安定	30	0.10	0.05-0.35	0.32	0.17-0.58	3.6	-18.4
中立	85	0.00	-0.02-0.02	0.65	0.26-1.13	6.4	4.4
不安定	28	-0.19	-0.52-0.10	0.53	0.29-0.76	5.3	151.5

2. 観測サイトの概要と解析手法

著者らは都市-大気間のエネルギー・物質の交換過程を明らかにすべく、実際の住宅街においてタワーを用いた長期観測を行ってきた。観測場所の周辺情報や解析手法については既存の論文^{4,6)}に詳しく説明されているので、ここでは概要のみを示す。

(1) 観測サイト

観測タワーの設置点は東京都大田区久が原である。周辺の地域は1km四方に渡り高さのほぼ均一な低層住宅地(平均高さ7.3m)が広がっている。建蔽率は47%程度であり西欧に比べると比較的建物が密集した住宅街である。観測サイトの幾何パラメータを表-1にまとめた。表中のゼロ面変位(z_d)は、幾何パラメータを説明変数とした経験式⁷⁾を用いて求めた。以降、 z' は測定高度 z から z_d を引いた実質高度とする。また空気力学的粗度 z_0 は、 z_d と後述する風速の鉛直分布から、風速の対数分布を満たすように同定した。得られた粗度1.1mはMacdonald *et al.* (1998)の方法⁷⁾による予測値(0.58m)より大きい結果となった。均一な住宅街とはいえ、実際の建物高さには若干のばらつき(表-1参照)があり、このばらつきが z_0 を大きくしていると考えられる。

(2) 計測手法

測定項目と測定機器の一覧を表-2に示す。都市キャンपी上の4高度(29・21・15・11m)に超音波風速計を設置し、風速の3成分と気温を8Hzのサンプリング周期で計測した。タワーによる乱れの影響が出ないように、風速計はタワー幅の1.5倍離して設置している。気温の測定は、10高度(29・21・17・14・11・9・7・5・3m)で行った。平均気温分布の測定には、極細の裸熱電対を

用いた。中村ら(1986)⁸⁾によれば、本観測で使用する熱電対の測定値は気温に対して0.1°C以内の精度があることが見込まれる。

(3) 解析手法と使用したデータ

運動量・顕熱フラックスの算出には渦相関法を用いた。

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} \quad (1)$$

$$H = c_p \rho \overline{w'T'} \quad (2)$$

ここで、 τ : 運動量フラックス、 H : 顕熱フラックス、 $'$: 変動成分(平均値からの差)、 $\overline{\quad}$: 時間平均を表す。また u_* : 摩擦速度、 T_* : 摩擦温度、 L : モニン・オブコフ長さは次式のように定義される。

$$u_* = (\tau / \rho)^{1/2} \quad (3)$$

$$T_* = -\frac{H}{c_p \rho u_*} \quad (4)$$

$$L = -\frac{u_*^2}{k(g/T)T_*} \quad (5)$$

フラックス算出の乱流統計時間は60分で、風速計の傾き補正のための傾度補正⁹⁾を行っている。熱電対による平均気温は1秒間隔で測定されたデータを60分ごとに平均した。

本論では、継続的に取得されたデータのうち、2002年9月から2003年3月までのデータを用いる。データの品質を高く維持するため、曇りまたは雨の日のデータは除去した。最寄りの気象官署である東京のデータを用いて日照率が80%以上である日を選定した。また、平均水平風速が $2.5ms^{-1}$ 以下、または平均化時間内に風向が大きく変化するようなデータは除去した。さらに、地形傾斜の影響を受ける東寄りの風が吹いているデータは除去した。この風向によるデータ選別により、タワー自身による乱れの影響が出る可能性のあるデータも自動的に除去される。後章で述べる風速や運動量プロファイルの大気安定

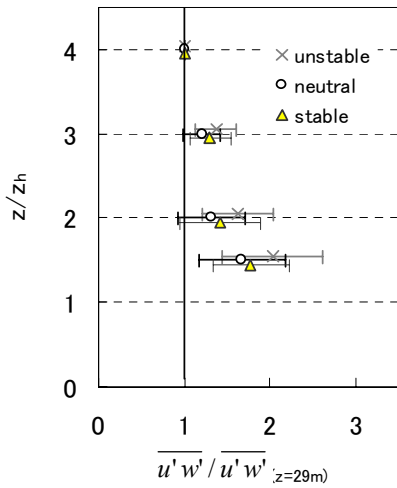


図-1 大気安定度別のせん断応力プロファイル

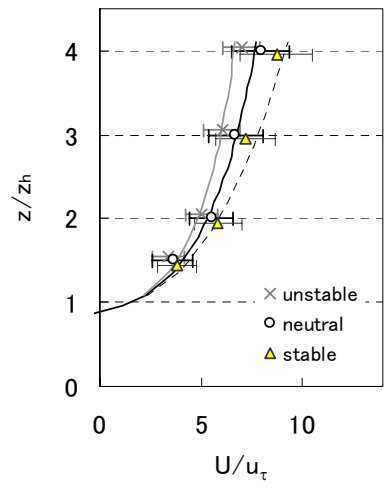
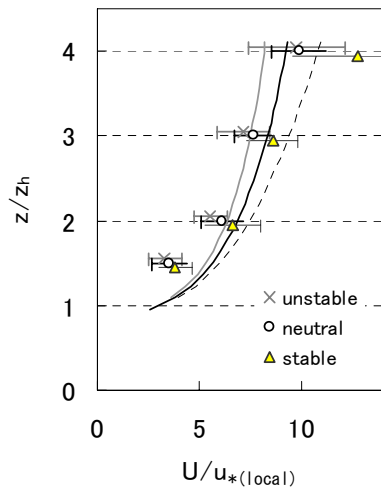


図-3 大気安定度別の風速プロファイル

左：ローカルスケールを行った場合

右：キャノピー高さに外挿したせん断応力を用いて求めた摩擦速度でスケールした場合

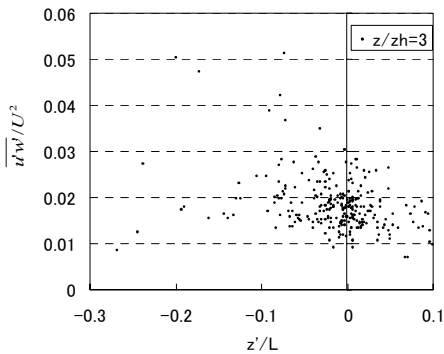


図-2 高度21mにおける運動量のバルク係数（局所摩擦抵抗係数）と大気安定度の関係

度依存性（図-1,3）のため、データを大気安定度によってグループ分けし（安定、中立、不安定の3グループ）、それぞれのグループ毎に平均値と分散を求めた。表-3に各グループにおけるデータサンプル数や平均的な気象条件を示す。

3. 結果と議論

(1) 運動量フラックスのプロファイル

高度29mでのせん断応力で正規化したせん断応力 $(\overline{u'w'})$ の分布を図-1に示す。縦軸は建物高さ z_h で無次元化した高さである。 $\overline{u'w'}$ は高度とともに減少する。地表面が均一でない場合、測定高度によってフラックスのソースエリアが異なり、これに対応した地表被覆の差異が測定されるフラックスに影響を与える可能性があるが、本観測サイトは前述のように非常に均一な住宅街であるため、この影響は考えにくい。一般に水平方向に圧力がかけられて生じる流れの境界層では、水平方向の圧力勾配とせん断応力の鉛直勾配がつりあう形となり、せん断応力は一定とはならず線形的に減少する。都市の接

地境界層でフラックスが一定になる層があるかないかは、いまだ議論の分かれるところであるが、観測事実や実験結果の多くはフラックスが一定にならないことを支持しているようである（例えば、Oikawa and Meng (1995)¹⁰、Cheng and Castro (2002)¹¹）。ここでさらに着目したいのは、不安定時に運動量フラックスの勾配が大きくなることである。これは前報⁹でも示したことが、物理的な説明は十分に行われていなかった。図-2に示したのは、運動量のバルク係数（流体力学的には局所摩擦抵抗係数）と大気安定度の関係である。結果のばらつきは大きいものの運動量のバルク係数は不安定時に大きくなる傾向があり、過去の接地層研究（例えば、Louis et al., 1979¹¹）と同様の結果が得られている。中立時と不安定時では風速に明確な大小関係がないことから（表-3）、不安定時はより大きな摩擦が生じていると考えられ、その結果、せん断力の鉛直勾配も大きくなったと思われる。

(2) 水平風速のプロファイル

次に水平風速のプロファイルについて議論する。接地層理論では、水平風速は摩擦速度スケールで規格化することにより、大気安定度と高さのみの関数で表現できているが、ここで問題となるのは、図-1に示した運動量フラックスのうち、どの高さの値を用いて摩擦速度を決定するかである。前述したように、運動量フラックスは高度方向に一定ではない。従来の都市接地層研究では建物高さの2-3倍の高さで計測されたフラックスを地表面フラックスとみなし、このフラックスから次式を用いて摩擦速度を求め、これをスケールングに用いてMOSの適用性について議論している（例えば、Roth, 2000³；Oikawa and Meng, 1995¹⁰）。以降、これを local scaling と呼ぶ。対流混合層研究などで用いられている local similarity（例えば、Sorbjan, 1988¹²）とは区別されたい。

$$u_{*local} = (\overline{u'w'_{local}})^{1/2} \quad (6)$$

このようにしてスケールングした大気安定度別の水平風

速プロファイルを図-3左に示す。図中の曲線は次式より算出した風速分布である。

$$\frac{U}{u_*} = \left(\frac{1}{k}\right) \left\{ \ln\left(\frac{z-z_d}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{z-z_d}{L}\right) \right\} \quad (7)$$

ここで、 $\Psi(z-z_d/L)$ はモニソーオブコフ相似関数¹³⁾である。local scalingされた風速分布は既存の関数形から大きくそれてしまい、大気安定度依存性も明確でない。つまり風速分布の基準化としてlocal scalingでは既存の理論と合致しないことがわかった。

そこで、次に運動量フラックスの分布を屋根面高さ z_h に線形外挿して得られる摩擦応力から無次元化に用いる摩擦速度 u_τ を計算した(便宜上、surface scalingと呼ぶ)。

$$u_\tau = \left(u'w'_{z=z_h}\right)^{1/2} \quad (8)$$

基準とする高さを屋根面高さとしたのは次の理由による。都市キャノピー内では個々の建物による形状抵抗と運動量フラックスの吸収量がバランスするため、運動量フラックスはキャノピー高さで最大値となり、キャノピー底部に向かうにつれて減少していく。このことはRotach (1993)の観測¹⁴⁾やLESを用いた都市キャノピー流れの数値実験²⁾において確かめられている。したがって、運動量フラックスを屋根面高さに線形外挿することは都市境界層における地表の摩擦速度を決定する上で理論的にも適当である。運動量吸収高さとしてのゼロ面変位(z_0)¹⁵⁾とは異なることに注意されたい。

surface scalingされた水平風速の分布(図-3右)は既存のプロファイル関数(図中の曲線)によく従う。中立時の対数分布だけでなく、大気の大安定度による風速勾配の変化もよく合致している。本結果はsurface scalingが妥当であることを示している。Cheng and Castro(2002)¹⁾は建物模型を配列させた中立風洞実験において、キャノピー上方におけるInertial Sublayerで計測されるせん断応力よりもキャノピーに近いRoughness Sublayer内のせん断応力を用いた方が風速の対数則分布により従うことを述べており、本研究と似た見解を示している。運動量フラックスが一定でないにもかかわらず、適切なスケールングを行えば、風速の対数則(さらに大気安定度依存性も含めて)が満たされることは興味深い。

(3) 摩擦温度と温位のプロファイル

熱および温位についても前節と同様の解析を試みた。温位プロファイルは摩擦温度(T_*)と地表面の温位(θ_s)を用いて規格化する。また中立時のデータは T_* がゼロに近くなり統計的に不安定となるので表示していない。熱のスケールングとなる摩擦温度(T_*)には顕著な高度依存性はみられず、運動量フラックスの鉛直分布とは対照的な結果となった。そのため、スケールングに用いる T_* にはlocal scalingの平均値を与えた。都市のような複雑な幾何形状で、地表面の代表温位(θ_s)を与えるのは非常に難しい。本研究では測定された温位プロファイルが次式にFittingするよう θ_s を帰納的に同定した。

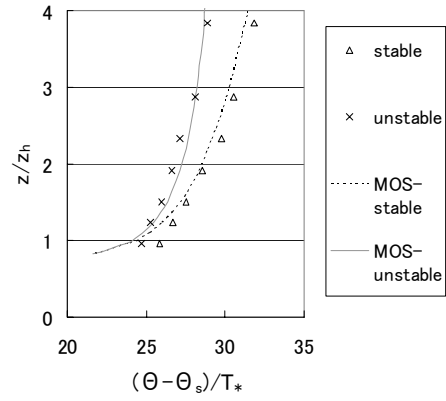


図-4 温位プロファイルの大気安定度依存性

$$\frac{(\theta - \theta_s)}{T_*} = \left(\frac{1}{k}\right) \left\{ \ln\left(\frac{z-z_d}{z_T}\right) - \Psi_H\left(\frac{z-z_d}{L}\right) \right\} \quad (9)$$

ここで、 $\Psi_H(z/L)$ はモニソーオブコフ相似関数¹⁴⁾であり、熱粗度 z_T は $\ln(z_0/z_T)=2.7$ を仮定して与えた。温位プロファイルの結果を図-4に示す。温位の分布は大気の大安定度によって変化し、風速同様、既存のプロファイル関数によく従う。

(4) 無次元化した風速・温位勾配(シア関数)

シア関数は物理量の勾配とフラックスを結び付ける拡散係数に密接に関係しており、モニソーオブコフ相似則の中でも最も重要な関数形である。この関数形はメソスケールモデルなどにおいて地表面の境界条件としても用いられており、都市域でこの関数形を確認しておくことは工学的にみても非常に重要である。運動量・熱のシア関数は次式で示される。

$$\phi_M^{-1} = \frac{u_\tau}{kz'} \frac{dz}{dU} \quad (10)$$

$$\phi_H^{-1} = \frac{T_*}{kz'} \frac{dz}{d\theta} \quad (11)$$

慣例に従って、この統計量は無次元量の逆数で表す。複数の高度により計測を行っているため、これらの組み合わせにより複数の高度でシア関数が計算できる。そこで、高さ別にこれらの統計量を整理した結果を図-5にまとめた。図中の実線は既存のシア関数^{13,16)}である。

a) 無次元化した風速勾配 キャノピーから十分に離れた高度($z/z_h=2.7$ 以上)では算定された無次元風速勾配は従来のシア関数に近い。しかし、キャノピー近く($z/z_h=2.3$)ではこれを超えるようになり、その傾向は中立から不安定時に顕著である。同様の傾向は植生キャノピー近傍においてもみられる¹⁷⁾。建物の大きい凸凹によって作られた乱れが勾配型拡散で予測される以上の運動量輸送を誘起していると考えられる。

b) 無次元化した温位勾配 無次元化した温位勾配は従来のシア関数とほぼ等しく、また顕著な高度依存性も認められない。スカラー量である熱は建物の凹凸の影響を受けないためと考えられ¹⁸⁾、平原など粗度の小さい

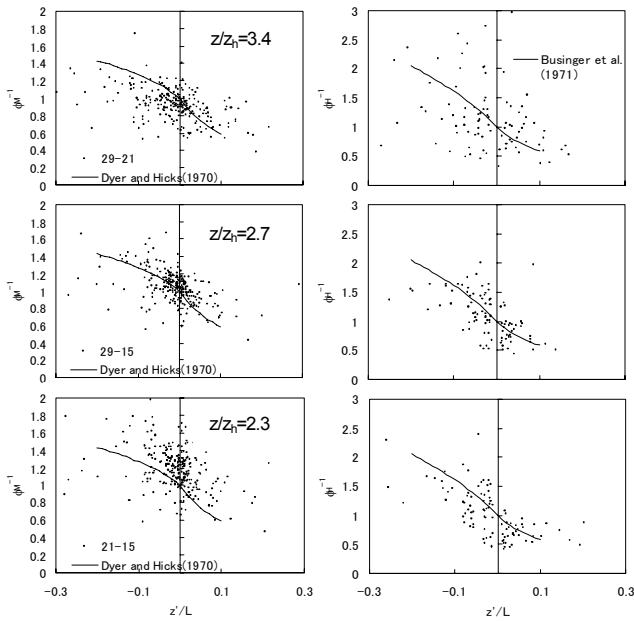


図-5 高度別のシア関数(無次元化した物理量勾配と大気安定度の関係)

左列: 風速(ϕ_M^{-1}) 右列: 温度(ϕ_T^{-1})
上から $z/z_h=3.4, 2.7, 2.3$

地表面と同様, シアによる熱輸送理論の枠組みが都市キャノピー近傍にも適用できると考えられる. これは前報⁴⁾で述べた, 熱に対するRoughness sub-layerの影響範囲は運動量に対するそれと比べて狭くなる, という結論を定性的に支持している.

(5) 無次元化した風速・温位分散 (乱流相関係数)

ここでは乱流相関係数について議論する. 運動量および熱の乱流相関係数は以下の式で表される.

$$-r_{uw} = \overline{-u'w'} / \sigma_u \sigma_w \quad (12)$$

$$|r_{wT}| = \overline{|w'T'|} / \sigma_w \sigma_T \quad (13)$$

ここで, σ は添え字に示した物理量の標準偏差を示す. 乱流相関係数は, 乱れに対する鉛直輸送の効率性を示す指標であり, 境界層研究においてよく用いられている. 前節で述べたシア関数 (勾配に対する輸送量) とは物理的な意味が異なるので注意が必要である. 本節ではこの統計量を示し, 前節のシア関数と比べながら, 運動量・熱の乱流輸送の特徴について考察する. 測定結果と既存のMOS関数^{19,21)}を図-6に高度別にまとめた.

a) 運動量の乱流相関係数 $z/z_h=4.0$ を除いて $-r_{uw}$ は従来型のMOS関数よりも大きくなる. 同様の傾向は他の都市における乱流観測結果においても得られている (例えば, Roth²²⁾, 神田ら²³⁾など). この傾向は低高度ほど顕著であり, キャノピー近くでは輸送の効率が非常に大きくなっている. 前節での議論と同様, 都市キャノピー内の建物が作り出すWakeによる形状抵抗が運動量輸送を向上させているためだと考えられる. 興味深いことに,

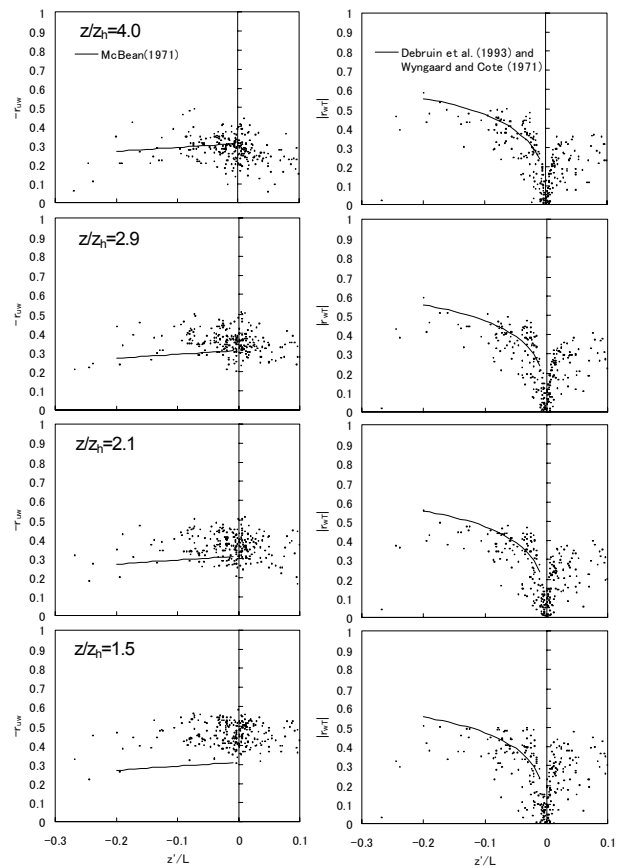


図-6 高度別の乱流相関係数と大気安定度の関係

左列: 風速($-r_{uw}$) 右列: 温度(r_{wT})
上から $z/z_h=4.0, 2.9, 2.1, 1.5$

図-5において計測値とシア関数との一致が見られた高度付近 ($z/z_h=3.0$) においても, $-r_{uw}$ は依然として既存のMOS関数よりも大きい値を示している. このことは, 都市の凹凸効果の影響の現れ方は乱流統計量によって異なることを示しており, Roughness sub-layerの影響範囲を乱流統計量によって決定する際には注意が必要である.

b) 熱の乱流相関係数 一方, 熱の輸送効率 $|r_{wT}|$ はその高度においても概ね既存のMOS関数と一致する. 温度のシア関数での議論と同様, スカラー量である熱は建物の凹凸の影響を受けず, 既存の接地層理論が都市接地層内の広い範囲で適用できると考えられる.

4. 結論

住宅街においてタワーを用いた風速, 温度, 乱流のプロファイル計測を行い, 風速・温度のシア関数, 運動量・熱の乱流輸送効率について調べた. 本研究の主要な結論は以下のとおりである.

(1) 運動量フラックスは高度とともに減少する. 無次元化された水平風速分布は既存のプロファイル関数に従うが, これは運動量フラックス分布を屋根面高さに線形外

挿して求められる値から計算した摩擦速度 u_τ を用いて無次元化した場合に限る。

- (2) 建物高さの約3倍付近では、無次元化した風速勾配（シア関数, ϕ_M^{-1} ）は、従来型のモニンオブコフ相似則に従う。しかしこの統計量は高さに対して依存性があり、都市キャノピーに近づくとき大きくなる。建物の大きい凸凹によって作られた乱れが勾配型拡散以上の運動量輸送を誘起していると考えられる。
- (3) 運動量の乱流相関係数 $-r_{wv}$ は従来型のMOS関数よりも大きくなり低高度ほどその傾向は顕著である。 $-r_{wv}$ は $z/z_H=3.0$ においても既存のMOS関数より大きくなっており、シア関数とは対照的である。都市の凹凸効果の影響の現れ方は乱流統計量によって異なる
- (4) 無次元化した温度分布の勾配 ϕ_T^{-1} および熱の輸送効率 $|r_{wT}|$ の両者は顕著な高度依存性はみられず、どの高度においても既存のMOS関数と合致する。スカラー量である熱は建物の凹凸の影響を受けず、既存の接地層理論が都市接地層内の広い範囲で適用できる。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究（B）（2）（課題番号：12450197）および若手研究（B）（課題番号：14750425）、戦略的創造研究（代表：神田学）による財政的援助を受けた。また観測場所の提供には、宗教法人カトリックお告げのフランシスコ修道会（代表：釘宮禮子様）に多大なるご協力をいただいた。また建物高さの測定に使用したレーザー距離計は、東京工業大学国際開発工学専攻太田教授にお借りした。ここに合わせて謝意を表す。

参考文献

- 1) Cheng, H. and I.P. Castro: Near wall flow over urban-like roughness, *Boundary-Layer Meteorol.*, **104**, pp.229-259, 2002.
- 2) Kanda, M., R. Moriwaki and F. Kasamatsu: Large eddy simulation of turbulent organized structure within and above explicitly resolved cubic arrays, *Boundary-Layer Meteorol.*, 2004 (in print).
- 3) Roth, M.: Review of atmospheric turbulence over cities, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **126**, pp.941-990, 2000.
- 4) 森脇 亮, 神田 学, 木元由花: 都市接地層における乱流プロファイルの気安定度依存性, 土木学会水工学論文集, **47**, pp.1-6, 2003.
- 5) 森脇亮, 神田学: 都市接地層における放射・熱・水・CO₂フラックスの長期連続観測, 水文・水資源学会誌, **16**, pp.477-490, 2003.
- 6) 森脇亮, 神田学, 菅原広史: 都市接地層における熱・水蒸・CO₂の乱流輸送効率の相似性, 水文・水資源学会誌, **16**, pp.491-500.
- 7) Macdonald, R.W., R.F. Griffiths, and D.J. Hall: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, **32**, pp.1857-1864, 1998.
- 8) 中村泰人, 平岡久司, 西村浩一: 市街地空間における気温分布性状に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, **364**, pp.48-56, 1986
- 9) McMillen, R.T.: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain., *Boundary-Layer Meteorol.*, **43**, pp.231-245, 1988.
- 10) Oikawa, S. and Y. Meng: Turbulence characteristics and organized motion in a suburban roughness sublayer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **74**, pp.289-312, 1995.
- 11) Louis, J.F.: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary-Layer Meteorol.*, **17**, pp.187-202, 1979.
- 12) Sorbjan, J.: Local similarity in the convective boundary layer (CBL), *Boundary-Layer Meteorol.*, **45**, pp.237-250, 1988.
- 13) Dyer, A.J. and B.B. Hicks: Flux gradient relationship in the constant flux layer, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **96**, pp.715-721, 1970.
- 14) Rotach, M.W.: Turbulence close to a rough urban surface Part 1: Reynolds stress, *Boundary-Layer Meteorol.*, **65**, pp.1-28, 1993.
- 15) Thom, A.S.: Momentum absorption by vegetation, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **97**, pp.414-428, 1971.
- 16) Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi and E.F. Bradley: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **28**, pp.181-189, 1971.
- 17) Shuttleworth, W.J.: Micrometeorology of temperate and tropical forest, *Phil. Trans. Roy. Soc. London B*, **324**, pp.299-334, 1989.
- 18) Thom, A.S.: Momentum, mass and heat exchange of vegetation, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **98**, pp.124-134, 1972.
- 19) McBean, G.A.: The variations of the statistics of wind, temperature and humidity fluctuations with stability. *Boundary-Layer Meteorol.*, **1**, pp.438-457, 1971.
- 20) De Bruin, H.A.R., W. Kohsiek, and J.J.M. Van Den Hurk: A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat, and water vapour using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities, *Boundary-Layer Meteorol.*, **63**, pp.231-257, 1993.
- 21) Wyngaard, J.C. and O.R. Cote: The budget of turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **28**, pp.190-201, 1971.
- 22) Roth, M., Turbulent transfer relationships over an urban surface 2: Integral statistics, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **119**, pp.1105-1120, 1993.
- 23) 神田学, 森脇亮, 鈴木謙, M. Roth, T.R. Oke: 都市の接地境界層における乱流相似関数について, 天気, **47**, pp.493-501, 2000.

(2003. 9. 30受付)