

都市接地層における乱流プロファイルの 大気安定度依存性

DEPENDENCIES OF PROFILES OF TURBULENT FLUXES ON ATMOSPHERIC STABILITY 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)

To investigate the dependencies of the profiles on the atmospheric stability (z/L), field measurements were carried out for wind velocity, temperature and turbulent fluxes in and above a dense residential canopy. 1) The vertical profile of wind velocity varies with (z/L). It deviates from the conventional similarity function in the unstable condition. 2) Momentum flux slowly decrease with height. This tendency is more significant in the unstable condition. 3) Skewness of u above the canopy is larger than the value reported in the vegetation studies. 4) Inversion layer is formed within the canopy around the sunrise due to the local heating of air near the roof top. 5) The gradient of potential temperature under unstable condition is dependent on the atmospheric stability but is relatively larger than the one of the conventional similarity function. 6) The range of roughness sub-layer for heat is smaller than the one for momentum.

Key Words: Profile, Turbulent transport, Shear function, Urban, Field measurement

1. はじめに

都市域における水文素過程には未解明な点が多く、都市一大気間のエネルギー・物質の輸送を直接的に担う乱流の特性を把握することは極めて重要である。メソ気象モデルでは、都市一大気間の熱・エネルギーの乱流交換過程は植生モデルと同様に取り扱われ、モデルパラメータを調整することにより都市の効果が表現されていることが多い^{1), 2)}。しかし都市ではキャノピーを構成する建物自体が大きな抵抗体であるため、キャノピー内外の乱れや気温分布の性状は、植生のそれとは大きく異なることが予想される。現地観測による都市境界層乱流の実態解明は行われつつあるが（例えば、Oikawa and Meng(1995)³⁾やRoth(2000)⁴⁾）、これらの研究は短期間のデータに基づく断片的な結果に限られている。熱的な作用が乱流輸送に及ぼす影響は大きいにもかかわらず、風速、気温、乱流フラックスのプロファイルの大気安定度依存性はこれまでほとんど調べられていない。

著者らは東京の密集住宅街上空において年間を通じた継続的な乱流計測を行っており、フラックスの季節変化特性やスカラ間の乱流輸送の相似性などについて報告

してきた⁵⁾⁻¹⁰⁾。本研究では、2002年8月より新たに開始した風速、温度、乱流プロファイル計測の結果を示し、それらの大気安定度依存性について議論する。現段階で観測データはまだ十分に蓄積されているとは言い難いが、近年開発が進められている都市キャノピーモデル研究にとって、現地観測データの早急な公表が必要であることを考慮し、ここに報告する。

2. 観測概要と解析手法

都市域の接地境界層における放射・熱・水・物質収支を包括的に把握することを目的として、気象観測用のタワーを低層住宅地内に建設し長期的な連続観測（久が原プロジェクト）を2001年5月より開始している。観測タワーの設置点は東京都大田区久が原である。観測タワー周辺の地域は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。建物高さ z_h の測量にはレーザー距離計（JUNOPTIK社；LEM300-GEO）を用い、タワー周辺部の622戸の建物高さを測定した。また建蔽率 λ_p ・フロントルエアインデックス（風上方向からみた場合の建物投影面積と敷地面積の割合） λ_f ・緑

表-1 都市の幾何パラメータ

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 インデックス	λ_f		52.0%
緑被率			21.9%
運動量粗度	z_0		0.58m
ゼロ面変位	z_d		5.3m

被率は航空写真より判別した。

都市における運動量粗度 (z_0) およびゼロ面変位 (z_d) には数多くの算出法が提案されているが¹¹⁾、本研究では比較的広範な幾何条件に適用できるMacdonald et al.(1998)¹²⁾の式を用いた。

$$\frac{z_d}{z_h} = 1 + 4.43^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1) \quad (1)$$

$$\frac{z_0}{z_h} = \left(1 - \frac{z_d}{z_h} \right) \exp \left\{ - \left[0.5 \frac{c_d}{k^2} \left(1 - \frac{z_d}{z_h} \right) \lambda_f \right]^{-0.5} \right\} \quad (2)$$

ここで、 c_d は抵抗係数1.2、 k はカルマン定数0.4である。都市の幾何パラメータと $z_0 \cdot z_d$ をまとめて表-1に示す。

(1) 風速および乱流のプロファイル計測

測定項目と測定機器一覧を表-2に示す。都市キャンピー上の4高度(29・21・15・11m)に超音波風速計を設置した。観測に使用したタワーはトラス式構造の自立型タワーであり充実率は0.27である。タワー自体の影響を排除するため、タワーと超音波風速計の距離はタワーの幅の1.5倍とした。またデータを風向によって選別することによりタワーによる乱れの影響が出ないようにしている。都市における接地層の存在高度の下限は建物高さの2.5~3倍程度であると言われている⁴⁾。したがって高度29mと21m(建物高さの約4倍と3倍)は接地層に属し、高度15mと11m(建物高さの約2倍と1.5倍)は遷移層に属するものと考えられる。

(2) 気温のプロファイル計測

気温の測定は、10高度(29・21・17・14・11・9・7・5・3・0.75m)で行った。気温の測定には、極細の裸熱電対を用いた。日射のある外気中で、裸熱電対で気温を測定する場合、日射と長波放射により測定誤差が生じる。この測定誤差を小さくするには①できるだけ径の細い素線を用い、②温接点の両側の素線を長くすればよい¹³⁾。そこで本研究では直径0.025mmの熱電対を使用し、温接点の両側の長さが0.5cm以上となるように熱電対を作成した。中村ら(1986)¹³⁾の結果によれば、本観測で使用する熱電対の測定値は気温に対して0.1℃以内の精度があることが見込まれる。極細熱電対の温接点は点溶接により作成した。両端部は直径0.2mmの熱電対に点溶接し、支持装置の熱が温接点に伝導しないように細心の注意を払った。乱流計測と同様タワー自体の影響を最小限に抑

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, 3, 0.75m

表-3 解析対象日(9月12日)の大気安定度別気象要素

分類	時刻	z/L		U(ms ⁻¹)		U (ms ⁻¹)	H (Wm ⁻²)
		Ave.	Std.	Ave.	Std.		
安定	0-5	0.056	0.018	0.39	0.08	4.1	-14.7
中立に近い不安定	6, 16-18	-0.063	0.026	0.49	0.08	4.7	24.7
不安定	8-11	-0.168	0.056	0.62	0.13	5.4	185.1

えるため、タワーの柱から50cmの距離において熱電対を設置した。支持用熱電対はシールド付き補償導線に接続し、データロガー(Campbell社; CR23X)を用いてデータを収録した。

(3) 解析手法

運動量・顕熱フラックスの算出には渦相関法を用いた。

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} \quad (3)$$

$$H = c_p \rho \overline{w'T'} \quad (4)$$

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。

$$u_*^2 = (\tau / \rho) \quad (5)$$

$$T_* = -\frac{H}{c_p \rho u_*} \quad (6)$$

$$L = -\frac{u_*^2}{k(g/T)T_*} \quad (7)$$

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¹⁴⁾を行っている。気温は1秒間隔で測定されたデータを1時間平均した。

本論文では、欠測などの計測機器の都合により、乱流プロファイルについては9月12日、温度プロファイルについては8月31日のデータを用いて議論する。しかし高度29mにおけるフラックス計測は8月31日にも行われている。両日とも晴天であり、また日中南風が安定していた点で、気象条件は極めて類似している。乱流プロファイルの解析対象とした9月12日の気象要素(風向・風速(29mの測定値)、摩擦速度・大気安定度(21mと29mの平均値))を図-1に示す。9月12日の19時以降は風向が北に変化したために解析対象から除外した。この日のデータは大気安定度別に分類した(安定、中立に近い不安定、不安定の3グループ)。表-3に各グループにおけ

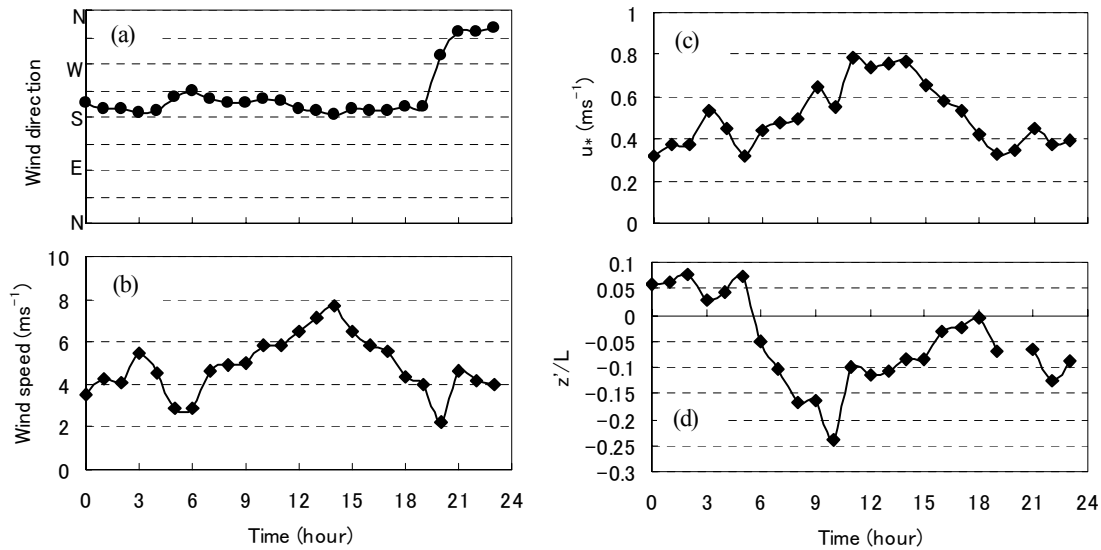


図-1 解析対象日 (9月12日) の (a) 風向, (b) 風速, (c) 摩擦速度, (d) 大気安定度, の時間変化

る気象条件の平均値と標準偏差を示す。大気安定度や摩擦速度の算定には29mと21mの平均を用いている。

3. プロファイル測定結果

(1) 風速および乱流プロファイル

a) 平均風速プロファイルとシア関数 大気安定度別 (表-3参照) の水平風速プロファイルを図-2に示す。プロットは平均値, 誤差バーは標準偏差である。風速は摩擦速度 u_{*r} (接地層と見なせる29mと21mのデータの平均値) で無次元化している。縦軸は平均建物高さ z_h で無次元化している。図中の曲線は, 次式より算出した風速分布である。

$$\frac{U}{u_*} = \left(\frac{1}{k} \right) \left\{ \ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) - \Psi \left(\frac{z - z_d}{L} \right) \right\} \quad (8)$$

ここで, $\Psi(z-z_d/L)$ はモニソーオブコフ相似関数¹⁵⁾である。

風速分布は大気の安定度によって変化し, 不安定時は風速の勾配 (dU/dz) は小さく, 逆に安定時には勾配は大きくなる。風速分布は $z/z_h = 1.5$ のデータ以外は既存の相似関数にほぼ従っている。 $z/z_h = 1.5$ における U/u_{*r} が相似関数より常に小さくなっているのは, この高度が遷移層 (roughness sub-layer) に含まれており, 都市キャノピー内の抵抗物 (建物) の影響を受けているためだと考えられる。建物近傍で対数則を外挿した風速よりも測定される風速は小さくなる傾向は, 風洞実験によっても確かめられている¹⁶⁾。ここで注目したいのは, 大気が不安定になると風速勾配が既存の相似関数から右側 (U/u_{*r} が大) にずれ, 中立に近い時の風速分布とほとんど変わらないことである。この理由は現在のところ特定できていないが, 都市キャノピーではシア不安定による大規模組織渦や建物による後流の存在により平原で提案されたシア関数と異なることは可能性としてあり得ることである。今後データを蓄積しながら, 都市における新たなシア関数の提案を検討したい。

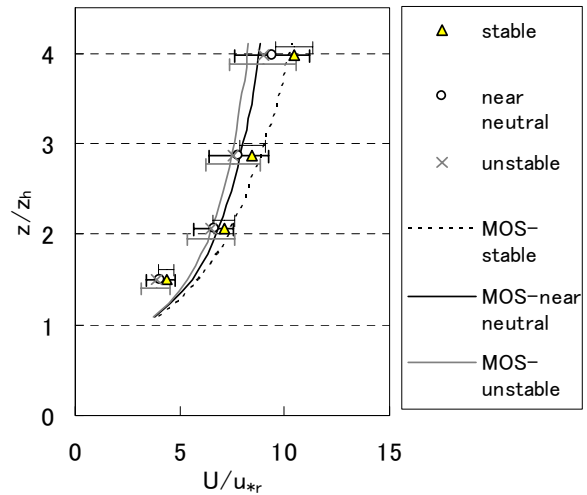


図-2 水平風速の鉛直プロファイル

図中の曲線は, モニソーオブコフ則より算出した風速分布。

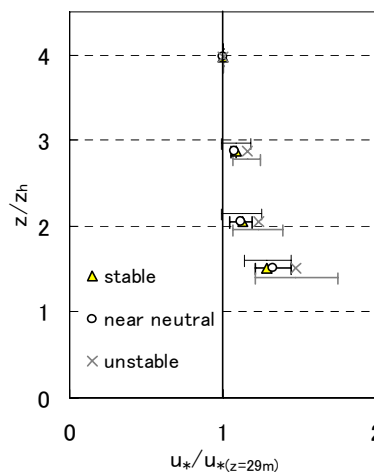


図-3 運動量フラックスの鉛直プロファイル

b) 運動量フラックス 図-3に運動量フラックスの鉛直プロファイルを示す。運動量フラックスは式(5)を用いて速度の次元で示し, $z=29m$ 地点の運動量フラックス $u_{*r}(z=29m)$ で無次元化している。運動量フラックスは都市キャノピーに近づくほど大きくなる。本観測ではキャノ

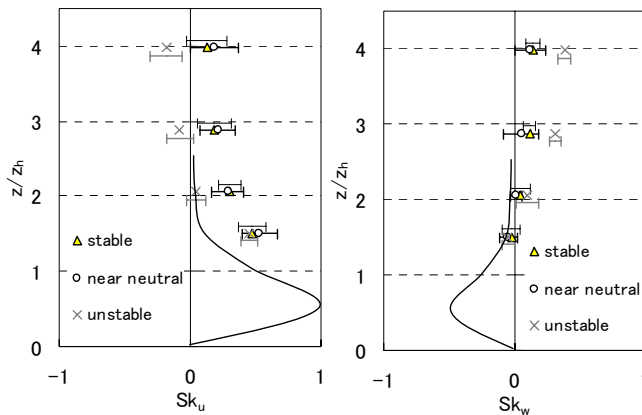


図-4 主流風速 U (左) と鉛直風速 W (右) のひずみ度のプロファイル. 図中の曲線は植生キャノピーにおける一般的なひずみ度の分布¹⁸⁾

ピー内 ($z/z_h < 1$) での乱流計測を行っていないが, Oikawa and Meng(1995)³⁾は都市キャノピー内外における計測により, 運動量フラックスのピークは $z/h=1.5$ 付近に存在することを報告している. 前節でも述べたように, 都市キャノピー近傍 ($z/z_h = 1.5$ 付近) では風速のシアが強まり, これに合わせて運動量輸送が活発に行われていると考えられる. 図-3によると $z/z_h < 3$ の運動量フラックスは大気が不安定になるほど大きくなる傾向が認められる. 不安定な大気条件下では浮力の効果により, roughness sub-layerの影響がより上方に伝わりやすくなるためであると考えられる.

c) ひずみ度 都市接地層においてひずみ度 (Skewness) のプロファイルを示した研究例は筆者の知る限りない. 図-4に主流風速 U と鉛直風速 W のひずみ度のプロファイルを示す. U のひずみ度は都市キャノピーに近づくにつれて正の値をとり, $z/z_h = 1.5$ では $S_{ku}=0.5$ である. 都市キャノピー近傍では水平風速分布の変曲点不安定により大規模組織渦が観測される³⁾. この構造の存在によりひずみ度は図のような分布となる. 図中に示した曲線は植生における一般的なひずみ度プロファイル¹⁸⁾である. 都市キャノピー近くでは植生と比べると S_{ku} が大きいのが特徴的である. 都市と植生キャノピーにおける乱流構造が大きく異なるのは, 建物の背後に生成されるキャノピースケールの後流の存在が挙げられる. この後流の存在がシア不安定による組織渦を助長し S_{ku} を大きくしているのかもしれない.

不安定時, 高度が高くなるにつれてひずみ度はゼロにならず, 都市近傍と逆符号のひずみ度になる傾向がある. 図-5に不安定時 (9月12日9時) における水平風速と鉛直風速の変動成分 u' , w' の四象限解析 ((a) $z/z_h=4$, (b) $z/z_h=1.5$) の結果を示す. $z/z_h=1.5$ では第2象限 (sweep運動) の出現頻度が高いが $z/z_h=4$ では逆の傾向になっている. Oikawa and Meng(1995)³⁾も不安定時のデータを元に同様の傾向を報告しているがその理由は明確に示されていない. このよ

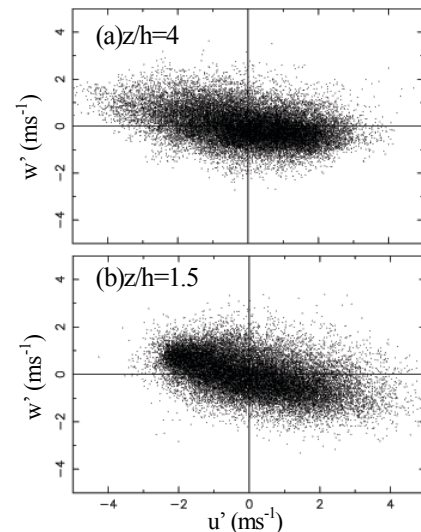


図-5 水平風速 u と鉛直風速 w の四象限解析 ((a) $z/z_h=4$, (b) $z/z_h=1.5$) (不安定時: 9月12日9時)

うな結果になるのが不安定時のみに起きること, 上方ほどその傾向が強いことを考えると, 境界層スケールの熱的な対流の影響を受けている可能性がある.

(2) 温位および顕熱フラックスプロファイル

温位のシア関数を同定するには, 気温の鉛直分布と顕熱フラックスの同時計測が必要となるが, これまで都市においてこのような観測例はない. 本節では温位プロファイルの日変化と温度のシア関数について検討する.

a) 都市キャノピー内外の温位プロファイル 図-6に温位プロファイルの結果を示す. 温位は建物高さ $z/z_h=1$ の温位 θ_h からの差で表示している. 各グラフの下に対応する時刻を凡例で表示した. 夜間は温位勾配 ($d\theta/dz$) が正であり, 夜間に負になる顕熱フラックス (図-7) と合致している. 朝6~7時頃になると, $z/z_h=1$ 付近で温位は極大値をもつ. キャノピー上空では不安定 (温位勾配が負) であるのに対し, キャノピー内部では局所的に安定な状態が継続している. これは日の出直後の時間帯は太陽高度が低いために屋根面のみが集中的に加熱され, その結果, 屋根面近傍の空気塊だけが升温したと考えられる. その影響は拡散によってキャノピー上方に伝わるが, キャノピー内は冷たい空気塊が溜まっている状態となる. その後, 太陽高度の増加に伴って都市キャノピー内部 ($z/z_h < 1$) も暖められ, 温位勾配はキャノピー内外の全高度で負 (不安定) となる. 17時以降は太陽高度が低下しキャノピー内は再び日陰となり, キャノピー内 ($z/z_h < 1$) では温位が低下する.

b) 都市上空の温位プロファイルとシア関数 温度のシア関数を議論する際, 地表面温度の与え方が重要となる. 都市のような形状が複雑なキャノピーでは代表温度の決定が困難であり, 代表温度として様々な温度が定義されその比較研究が行われているが¹⁹⁾, 都市上空の温位プロファイルから同定した代表温度の検討は行われていない. 本節では, 既存の温度シア関数を用いて都市

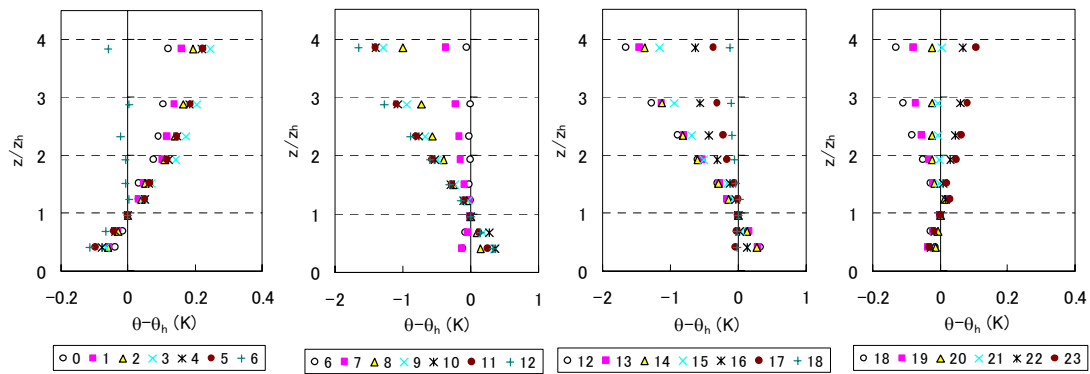


図-6 都市キャノピー内外の温位のプロファイル

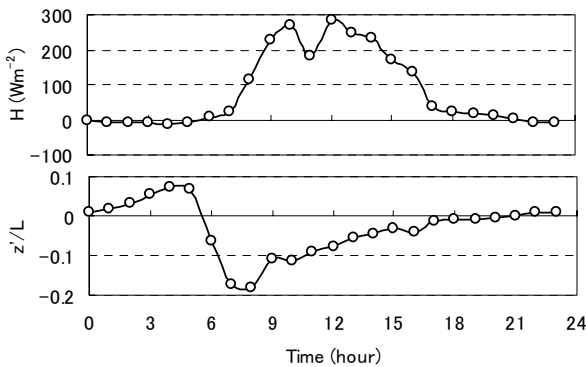


図-7 顕熱フラックス (上) と大気安定度 (下) の時間変化 (2002年8月31日)

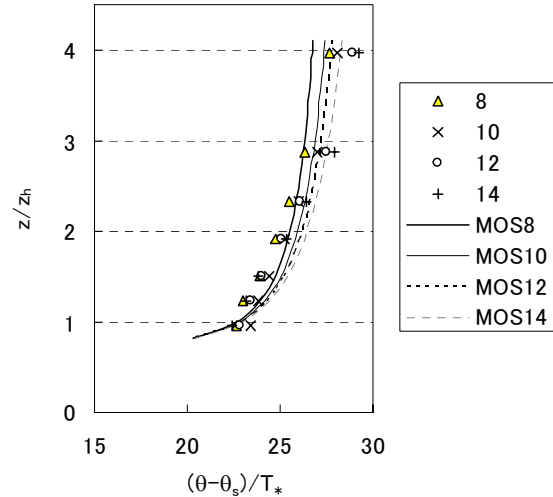


図-8 温位と地表面温位の差のプロファイル

の代表温度を求め、この温度を用いてプロファイルの大気安定度依存性を議論する。地表温位は、上空の温位データを以下の式に代入して求めた。

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

ここで、 $\Psi_H(z/L)$ はモニン-オブコフ相似関数¹⁵⁾であり、熱粗度 z_T には森脇ら(2002)⁹⁾が本観測エリアで求めた $\ln(z_0/z_T)=8.5$ から与えた。 $z/z_h > 2$ 以上の高度で得られた温位を用いて地表温位 θ_s を求めその平均値を採用した。各高度から求めた温位の標準偏差は 0.2°C 未満である。

図-8に温位と地表面温位の差 $(\theta - \theta_s)$ を T_* で無次元化した統計量のプロファイルを示す。統計不安定を避けるため、図中では T_* の絶対値が 0.2 以上であった時間帯に限定して、例として8, 10, 12, 14時のデータを示した(各時刻の大気安定度は図-7参照)。図中の曲線は式(9)より算出した温位分布である。上空($z/z_h > 2$)では各時刻とも既存の相似関数より温位勾配が大きくなる傾向がある。3.(1)で議論した風速分布に関しても不安定時に勾配が大きくなる傾向がみられたが、温位プロファイルでも同様の結果が得られており興味深い。また大気安定度によって温位分布が変化する傾向は既存の相似関数と合致していることから、温位分布の大気安定度依存性は都市上空においても認められることがわかった。

c) 顕熱フラックスのプロファイル

最後に顕熱フラックスのプロファイルについて検討する(図-9)。統計値の不安定性を避けるため、図には日

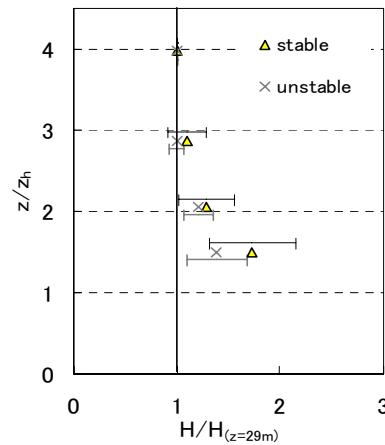


図-9 顕熱フラックスのプロファイル

中の不安定時と夜間の安定時のデータのみを示した。各高度の顕熱フラックスは $z/z_h=4$ の顕熱フラックスで無次元化している。顕熱フラックスは下方ほど大きくなる傾向がある。これは大気を加熱・冷却する熱源が地表面であることから妥当な結果である。渡辺ら¹⁰⁾は $z/z_h=3$ と $z/z_h=4$ で計測されたフラックスの比を調べ、運動量、水蒸気、二酸化炭素に比べて熱のフラックス比が1になりやすいことを示している。運動量フラックス(図-3)と比べると、 $z/z_h > 3$ では顕熱フラックスはほぼ一定になり、roughness sub-layerの影響範囲は狭いと判断できる。都市

は建物の凹凸によって構成されるため、運動量にとって都市は粗い地表面である。しかし太陽によって加熱、放射によって冷却される都市は、熱の立場からは一様と見なせる地表面であるといえる。

4. まとめ

現地計測によって都市キャノピー内外の風速・乱流・気温を計測し、それらのプロファイル特性を大気安定度別に検討した結果、以下のことが明らかになった。

1) 大気安定度によって風速分布は変化しその傾向は既存の相似関数に従う。しかし不安定時には既存の相似関数からずれる傾向があり、新たなシアー関数を提案する必要がある。2) 運動量フラックスは都市キャノピーに近づくほど大きくなり、その傾向は大気が不安定になるほど顕著である。3) 都市キャノピー近くでは植生と比べると水平風速のひずみ度が大きいのが特徴的である。また不安定時、上空ではひずみ度はゼロにならず、都市近傍と逆符号のひずみ度になる傾向がある。4) 都市キャノピー内外の温位分布は朝6~7時頃 $z/z_h=1$ 付近に極大が現れ、都市キャノピー内部では局所的に逆転層が形成される。5) 日中の温位プロファイルには大気安定度依存性が認められるが、既存の相似関数と比べて勾配が大きくなる傾向がある。6) 顕熱フラックスが変化する範囲はキャノピー近傍に限られ、運動量に比べて roughness sub-layer の影響範囲は狭いと判断できる。

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), 若手研究 (B) (課題番号: 14750425), 科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (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、宗教学法人カトリックお告げのフランシスコ修道会 (代表: 白石幸子様) 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) 浅枝隆, 藤野毅, ヴタンカ, 足永靖信: 都市キャノピーモデルの街区スケールへの適用, 水文・水資源学会誌, **10**, pp.308-318, 1997.
- 2) 田中賢治・中北英一・池淵周一: 琵琶湖プロジェクトの陸面過程モデリング, 水工学論文集, **42**, pp. 79-84, 1998.

- 3) Oikawa, S. and Meng, Y.: Turbulence characteristics and organized motion in a suburban roughness sublayer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **74**, pp.289-312, 1995.
- 4) Roth, M.: Review of atmospheric turbulence over cities, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, **126**, pp. 941-990, 2000.
- 5) 神田学・森脇亮・鈴木謙・マティアスロート・ティムオーク: 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**, pp. 453-462, 2000.
- 6) 神田学, 森脇亮, 鈴木謙, Roth M., Oke, T.R.: 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.
- 7) 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, 投稿中
- 8) 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, 投稿中
- 9) 森脇亮, 神田学, 渡邊倫樹, 松永和章: 都市域の陸面パラメーターの算定, 水工学論文集, **46**, pp. 79-84, 2002.
- 10) 渡邊倫樹, 森脇亮, 神田学, 松永和章: 都市域におけるコンスタント・フラックス層の存在条件について, 水工学論文集, **46**, pp.79-84, 2002.
- 11) Grimmond, C.S.B. and Oke, T.R.: Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form, *J. Appl. Meteorol.*, **38**, pp. 1262-1292, 1999.
- 12) Macdonald, R.W., Griffiths, R.F. and Hall, D.J.: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, **32**, pp.1857-1864, 1998.
- 13) 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
- 14) McMillen, R.T.: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain., *Boundary-Layer Meteorol.*, **43**, pp.231-245, 1988.
- 15) 近藤純正: 水環境の気象学-地表面の水収支・熱収支-, 朝倉書店, pp. 350, 1994
- 16) Macdonald, R.W.: Modeling the mean velocity profile in the urban canopy layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **97**, pp.25-45, 2000.
- 17) Rotach, M.W.: Turbulence close to a rough urban surface Part 1: Reynolds stress, *Boundary-Layer Meteorol.*, **65**, pp.1-28, 1993.
- 18) Kaimal, J.C. and Finnigan, J.J.: Atmospheric Boundary Layer Flows, 289pp., Oxford Univ. Press, New York, 1994.
- 19) Voogt, J.A. and T.R. Oke : Complete surface temperatures, *J. of Applied Meteorol.*, **36**, pp.1117-1132, 1997.

(2002. 9. 30受付)