

屋外都市模型による 建物高さの非一様性が大気に及ぼす影響の検討

OUTDOOR URBAN SCALE MODEL EXPERIMENTS ON THE EFFECTS OF BUILDING HEIGHT VARIATION ON THE ATMOSPHERE

森泉孝信¹・河合 徹²・稲垣厚至³・神田 学⁴
Takanobu MORIIZUMI, Toru KAWAI, Atsushi INAGAKI and Manabu KANDA

¹学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 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 工修 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

⁴正会員 工博 東京工業大学准教授 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

This paper shows the effects of building height variation on momentum and heat transfer characteristics using Comprehensive Outdoor Scale Model (COSMO). Turbulent fluctuations and radiations were monitored on the two different type arrays at the same time to investigate the essential effects of building height heterogeneity; the normal model included an aligned array of only 15cm concrete cubes, and the variable model had a geometrically same array but with two building heights of $15\text{cm} \pm 50\%$ (i.e. 7.5cm and 22.5cm). The uneven building array produced relatively strong mixing, and consequently the large drag coefficient. On the other hand, it showed a little difference in sensible heat transfer; there may exist a trade-off between the mixing intensity and the surface heating. The net radiations on the two sites were almost the same so that the building height variation was likely to have little influence on the heat balance as far as the current experimental condition is concerned.

Key Words : *building height variation, momentum transfer, heat transfer, roughness length, outdoor urban scale model experiment*

1. はじめに

近年の大規模な都市化により、ヒートアイランド現象や大気汚染などの多様な都市大気環境問題が顕在化している。これらの問題の解消のためには都市の複雑な幾何形状が上空大気に及ぼす影響を把握することが必須であり、これまで現地観測（例えば、Roth and Oke 1993¹⁾、Moriwaki et al. 2004²⁾）や風洞実験（例えば、Uehara et al. 2000³⁾）、数値シミュレーションといった様々なアプローチをもって検討がなされてきた。

中でも数値シミュレーションの進歩が著しい。表面熱収支の計算に関して組み込まれている都市キャノピーモデル (UCMs) の精度が向上しているからである（例えば、Masson 2000⁴⁾、Kanda et al. 2005⁵⁾）。このモデルは都市の持つ大きな熱容量や、その結果として生じる大きな熱慣性を良く再現できる。しかしながら空気力学的な面では計算に必須の熱や運動量に関する地表面パラメータ

についての知見が不足しており、従来の推定式に用いられる建蔽率やフロントルエリアインデックスのような指標では表しきれない建物高さの非一様性が熱・運動量輸送に及ぼす影響を検討することは非常に重要である。加えてモデルのアウトプットであるエネルギー収支が実測により十分検証されていないため、様々な条件における熱収支データの蓄積が必要となっている（例えば、Kawai et al. 2007⁶⁾）。

そこで本研究では建物高さの分散のみが異なる2つの都市スケールモデルを屋外に設置し、両者の運動量と熱に関するフラックスや統計量の比較検討を行った。本スケールモデルの特長としては以下のものが挙げられる。

① 屋外に設置してあるため、太陽放射やキャノピー内の日向・日陰分布が実都市と同様に実現される。② 他の手段では困難な統計量の気象安定度による変化が検討できる。③ 実都市での観測で問題となる地表面形状の複雑性や非一様性、また植生や人工廃熱といった要因の観測値への影響を一切考慮する必要がない。

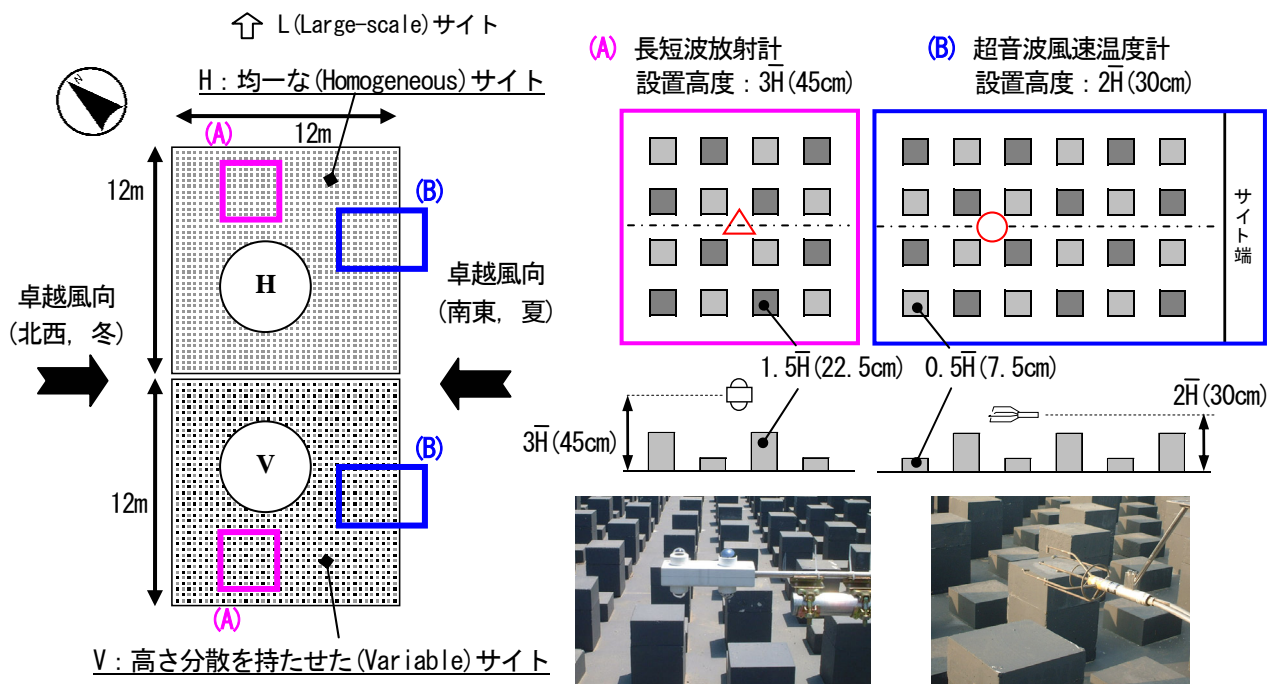


図-1 観測サイト全体図(左)と、Vサイトにおける測器の設置状況(右)．Hサイトでは全てのブロックの高さが等しいだけで、測器の設置位置は図と同じように交差点上である．(B)の風速計は冬季の設置位置で、夏季はサイト左端に移動させ、南東向きに設置する．

これらの特長を活かした主な研究としては、河合・神田(2007)⁷⁾が長期にわたる熱収支観測を行い、Kanda et al.(2007)⁸⁾は2つの異なるスケールのサイトを用いた実験から運動量粗度と熱粗度の特性を検討している．また、Inagaki and Kanda (2007)⁹⁾は本スケールモデルと都市域、郊外でのスペクトルや統計量の比較を行っている．

2. 観測概要

(1) 観測サイトCOSMO

日本工業大学(埼玉県南埼玉郡宮代町)において、1辺12mの正方形コンクリート基盤を横並びに2基設け、その基盤上にそれぞれ形状の異なるコンクリートブロックを配した(図-1)．配列は、東側の基盤に1辺15cm角の立方体ブロックを整列に、西側の基盤には底面が15cmの正方形で高さが7.5cm、および22.5cmの2種類のブロックを交互にそれぞれ並べ、模型都市を構築した．以下では、前者の均一な(Homogeneous)建物高さを有するサイトを”H”、後者の高さ分散のある(Variable)サイトを”V”と呼ぶことにする．建物と建物との間隔は両サイトに共通して全て15cmとしており建蔽率は25%、平均建物高さ \bar{H} も15cmで同一である．この建蔽率は欧米の平均的な住宅街に相当するもので、日本の典型的なものよりやや疎である．また風向きが変化してもフロントルエリアインデックスにサイト間の違いがない．よってこれら2つの都市模型上の観測を行うことで建物の高さ分

散のみが乱流輸送や熱特性に及ぼす影響を検討することができる．本研究における観測期間は2006年10月10日から2007年7月17日であり、観測開始から2007年4月までは北西、それ以降は南東が卓越風向であった．観測サイトは北西-南東方向を基準軸として配置しており、以下ではこの風向を0°とする．なお、本サイトに隣接してHの10倍スケール、すなわち1.5m角のブロックを整列配置したサイトがあり、”L”と呼称して結果の一部に使用している．

(2) 計測項目

風速変動や温度変動の観測にはKaijoの超音波風速計(DA600, TR-90AH)を用いた．プローブのパスは5cm、サンプリング周波数は50Hzで、設置高度は $2\bar{H}$ (平均建物高さの2倍)である．それぞれのサイトにおいて観測されたデータは同一のロガー(TEAC, DR-M3 MK2)1台を使用し同期取得した．

また、熱収支の検討のため長短波放射計(EKO, MR40)を両サイトの高度 $3\bar{H}$ に設置し、4成分(長波、短波それぞれの上向き、下向き成分)の1分間平均値をロガーにて取得した．

(3) 解析方法

取得した風速・温度データは30分ごとのデータセットとし、各種統計値の算出時には測器の傾きを修正する傾度補正、および線形トレンド除去を行った．フラックスの算出には渦相関法を用いている．風向に関しては風速

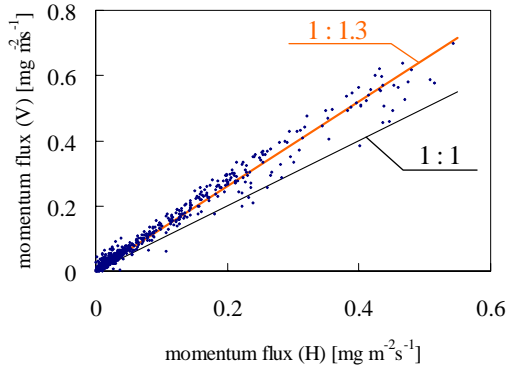


図-2 運動量フラックスの比較

計のプローブの形状を考慮して正面から±45°以内に収まるデータを使用した。さらに運動量フラックスが負であり、かつ大気安定度は中立から不安定であるもののみを解析対象とした。

抵抗係数 C_D は運動量フラックス $\overline{u'w'}$ および平均風速 U (ms^{-1})を用いて以下のように算出される。

$$C_D = -\overline{u'w'}/U^2 \quad (1)$$

運動量粗度 z_m (m)の計算にはモニン・オブコフの相似則(MOST)を仮定して得られる以下の式により、最小2乗法により求めた。

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z'}{z_m}\right) + \Psi_M\left(\frac{z'}{L}, \frac{z_m}{L}\right) \right] \quad (2)$$

ここに、 u_* は摩擦速度(ms^{-1})、 κ はカルマン定数(=0.4)、 L はオブコフ長さ(m)、 $z' = z-d$ で z は実際の測定高度(m)、 d はゼロ面変位(=0.46H; Macdonald et al. 1998¹⁰) (m)である。 Ψ_M (積分普遍関数)の式形にはDyer and Hicks (1970)¹¹を用いた。

また、熱粗度 z_T (m)の算出も z_m 同様の考え方により以下の式から計算した。

$$T_{aero} - T_{ref} = \frac{-T_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z'}{z_T}\right) + \Psi_H\left(\frac{z'}{L}, \frac{z_T}{L}\right) \right] \quad (3)$$

ここに、 T_{ref} は z' における気温(K)、 T_* は摩擦温度(K)、 T_{aero} は空気力学的温度(K)であり、本研究では長波放射量より求まる放射温度 T_R を与えた。

$$T_R = \left[\frac{L \uparrow - (1-\varepsilon)L \downarrow}{\sigma_{sb}\varepsilon} \right]^{0.25} \quad (4)$$

ここに ε は地表面の射出率で本サイトにおいては0.95、 σ_{sb} はステファン・ボルツマン定数(=5.67×10⁻⁸(W m⁻²K⁻⁴))である。また、式(3)の Ψ_H の式形は Ψ_M 同様にDyer and Hicks (1970)を使用した。

3. 運動量の輸送特性

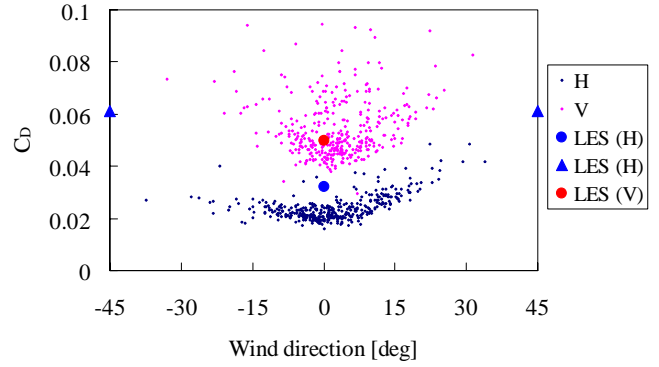


図-3 風向に対する抵抗係数。大きなプロット(LES)はLarge eddy simulationによる高度 $1\overline{H}$ における抵抗係数の計算結果であり¹³、2つの●はそれぞれ本サイトのH、Lと同じ幾何条件における風向0°の抵抗係数、▲は立方体ブロックを交互に配置したとき(staggered)の風向0°の抵抗係数。

(1) 運動量と抵抗係数

両サイトにおける運動量フラックスを対比して図-2に示す。横軸にH、縦軸にVにおける観測値をとった。このグラフから、都市の建物群に高さ分散を持たせた場合に運動量輸送が盛んになることが明らかである。図-2に示したオレンジ色の直線にほぼプロットが従っていることからその増加率は30%程度と大きい。萩島ら(2007)¹²は風洞実験において高さ分散の大きさを段階的に増加させながら観測を行い、高さ分散が大きくなるにつれてキャノピー全体の抗力が増加することを見出し、その理由として高さ分布のある配列では、より高層の模型の存在により平均模型高さよりも上空の気流が乱され運動量交換が盛んになったためだと考察している。

図-3には抵抗係数 C_D を風向に対してプロットした。Vでは建物の高さ分散の影響でばらつきがあるが、Hと比べれば明らかに大きい。また、図にはKanda (2006)¹³の行ったLarge-eddy simulationにおける計算値も参考として載せた。ただし本実験による計算値が高度 $2\overline{H}$ におけるものであるのに対しLESの計算高度は粗度要素の最高点、すなわちHでは $1\overline{H}$ 、Vでは $1.5\overline{H}$ である。また45°線上にあるLESの結果(▲)は本実験サイトに風向45°で吹くときの正面形状が近似的にstaggeredと見なせるためにプロットした。以上の理由により絶対値を議論することはできないが、本サイトにおける風向45°のような都市内に風が一直線に通り抜ける街路がない(staggered)場合は抵抗係数が相対的に大きくなること、そして建物の高さ分散を持たせた場合も大きくなることと本観測結果と一致している。

(2) 風速の無次元標準偏差

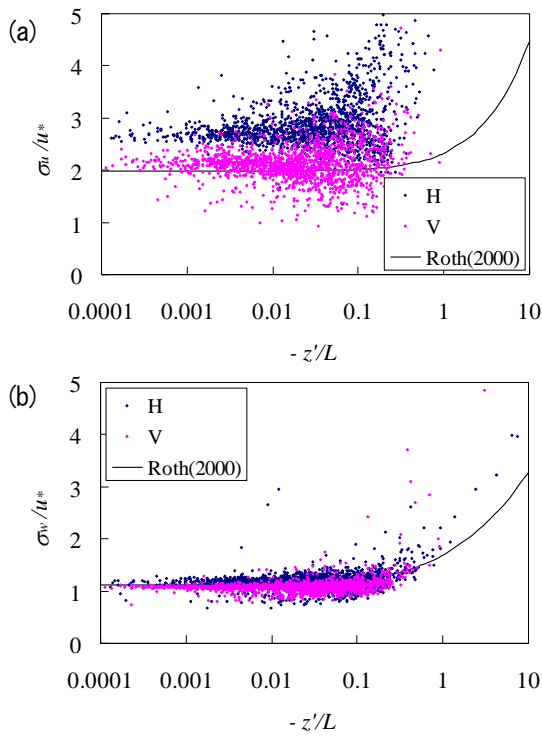


図-4 無次元標準偏差と大気安定度. (a)は主流風速成分, (b)は鉛直風速成分であり, グラフ中の曲線はRoth(2000)が示したものの.

MOSTによれば, 接地境界層における風速の標準偏差 σ_i ($i = u, v, w$) は接地層の代表速度である摩擦速度で無次元化すると大気安定度 z/L のみをパラメータとする普遍的な関数となる.

図-4に両サイトで計算した主流風速 u および鉛直風速 w に対する無次元標準偏差をそれぞれ示す. (a)の主流風速成分に見られるHとVの差は理論的には前項で確かめられたように u^* つまり乱流混合の強さの違いに起因するものとそれに伴う主流風速の分散 σ_u が変化したことによる複合的な結果と考えられるが, 実際には σ_u にはサイト間の違いがほとんど見られなかったため摩擦速度の大小関係が直接反映されている. 一方(b)の鉛直成分についてはH, Vが同じ傾向を示しており, Vにおいて鉛直風速分散は増大するものの, 摩擦速度でスケールリングすると幾何条件に依存しなくなることが分かる.

また, 図-4には実都市の参照値としてRoth(2000)¹⁴⁾ の提案した普遍関数を重ねた. 鉛直成分のグラフはよい一致が見られるが, 水平成分はそれぞれが異なっている. これについてInagaki and Kanda(2007)⁹⁾ は大気境界層スケールの渦が寄与しており, その程度によって無次元標準偏差が一律にならないことを指摘した(図-5). 境界層スケールの渦がほとんど関与しない中立時において無次元標準偏差が運動量粗度 (z_m) 依存性, つまり内部スケールの渦の強さによって規定されること(例えば, Panofsky et al. 1978¹⁶⁾), 一方でラフネスの小さい場合に

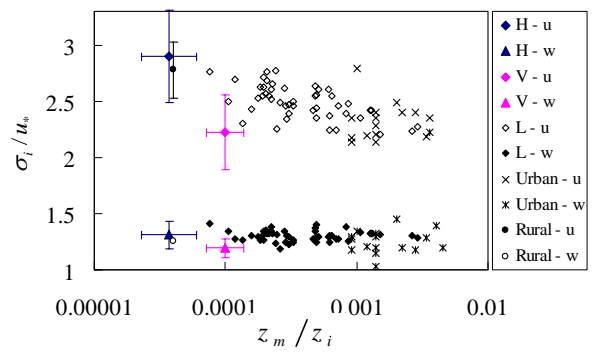


図-5 無次元標準偏差と z_m / z_i . LはInagaki and Kanda(2007), RuralはHögström(1990)¹⁵⁾の示した値であり, UrbanはRoth(2000)のFig. 3に与えられた諸都市における観測値.

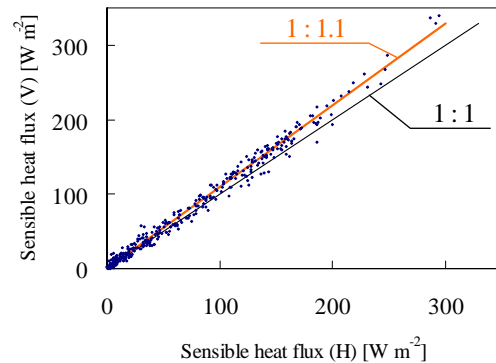


図-6 顕熱の比較

においては境界層高さ (z_i) に規定されること(例えば, Kaimal et al. 1976¹⁷⁾) を参考にその相対的なスケール z_m / z_i を導入すると, 様々なサイトにおける無次元標準偏差の違いを説明できるというものである. 図-5を見ると本結果を含め σ_u / u^* が減少傾向にある. Vは他に比べやや小さく, 内部スケールの渦の寄与が大きい. 一方, 諸地域で求められた鉛直成分は z_m / z_i の変化に対してほとんど反応しないことをInagaki and Kandaは示しており, 図-5のとおり本結果はそれを支持している. 鉛直風速の乱れは摩擦速度でスケールリングすることで地表面の粗度分布やスケールにあまり依存せず普遍的な関数で表現可能であることが示唆される.

4. 熱の輸送特性

(1) 顕熱

運動量の輸送特性に引き続き, 本章では顕熱の比較検討を行う. 図-6は両サイトにおいて観測された顕熱の比較図である. Vはやや大きくHより10%程度増加している. 運動量の全体的な増加率が30%ほどであったことから相対的に見ると両者の差が小さい. これは運動量輸送

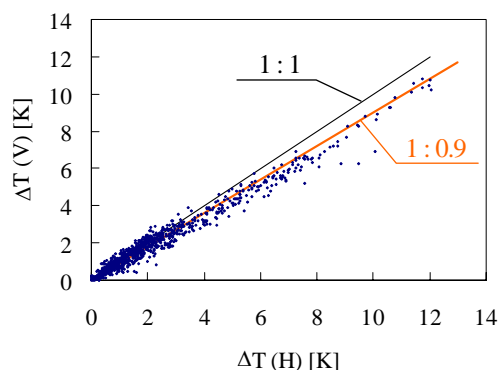


図-7 各サイトにおける鉛直温度差 ΔT （放射温度 - 高度 $2H$ における気温）の比較

が空気力学的な乱れの強さに大きく影響されるのに対し、熱輸送では空気力学的な面に加え地表面の熱収支が大きく影響するためである。つまりVでは前者の増加により熱の輸送効率（バルク係数）が大きくなるが、逆に効率的な輸送が表面温度を下げるフィードバックがはたらくことで図-7に示すように ΔT が減少し運動量輸送ほどの差を生み出さなかった。なおこの顕熱の増加は、放射温度の低下による若干の正味放射の増加と地中熱伝導の減少によって釣り合っている。

(2) 熱粗度

熱粗度は顕熱量を決定する重要なパラメータであるが、都市域での報告例はまれである。これは都市における観測自体が希少であること、風洞では熱の扱いが困難であることが原因であり、本スケールモデルの特色の1つとなっている。これを実際に求めたところ、両サイトとも同様なオーダーを持ち、また風向変化に対して敏感ではないことが分かった。

Brutsaert (1982)¹⁸⁾ はこのように表面温度を用いて算出された熱粗度のパラメタリゼーションとして、運動量粗度との比に粗度レイノルズ数 Re_* ($= u_* z_m / \nu$, ν は分子粘性で $1.46 \times 10^{-5} (m^2 s^{-1})$) 依存性があることを導いた (式(5))。

$$\kappa B^{-1} = \ln(z_m / z_T) = a Re_*^{0.25} - 2.0 \quad (5)$$

ここに a は地表面性状によって変化する定数であり、Brutsaertはbluff-roughな地表面に対して $a = 2.46$ を $Re_* = 10$ 付近の水面上における実験から導き、これまでのUCMsにおいてその式が使用されてきた。これに対してKanda et al. (2007)⁸⁾は本研究でも用いているHサイトと、10倍のスケールをもつLサイトにおける観測値から回帰曲線を求め、より都市に近い値として $a = 1.29$ を提案した。定義域はBrutsaertのそれより十分大きく ($100 < Re_* < 10000$) 先に述べた地表面条件の違いもあって大きく離れているが、 $a = 1.29$ を用いた回帰式が実都市での観測値にも近い曲線であることをKanda et al.は示している。そこに本実験における計算値を重ねて載せたものが図-8

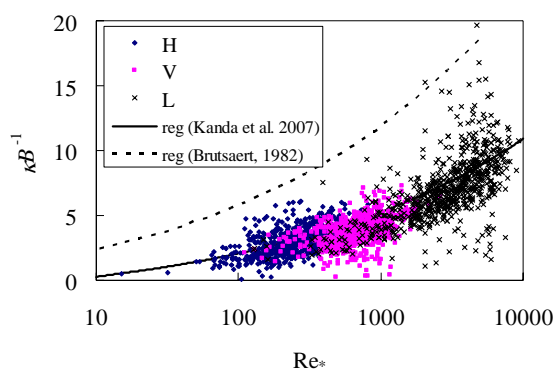


図-8 κB^{-1} と Re_* との関係。LはKanda et al. (2007)にて求めた値。また、2つのregはBrutsaert (1982)およびKanda et al. (2007)の示した回帰曲線。

である。驚くべきことにKanda et al.の示した回帰曲線には両サイトの計算値が概ね従っており、COSMOにおいては建物の凹凸という重要なパラメータに左右されることなく1つの式で表現できることを示唆している。一方Kawai et al. (2007)¹⁹⁾はCOSMOにおける実験値と実都市における観測値の違いに着目し、回帰式の係数 a が植生比率によって変化することを示した。したがってUCMsを用いたシミュレーションでは実都市における建物高さの分散度をパラメータ化する必要はなく植生比率のみを把握することにより、計算精度を一層高めることができる可能性がある。

5. 結論

本実験では建物高さが均一な場合と分散を持った場合の2通りの都市を模した屋外スケールモデルにおける実験観測により、以下の結論を得た。

- ① 運動量輸送は均一な建物群の並ぶ都市に比べ、高さ分散のある都市の方が約30%増加する。
 - ② 無次元標準偏差は主流風速と鉛直風速で特徴が異なる。前者は運動量輸送の差から類推できるようにVの値が小さくなるが、後者は両サイトで一致する。
 - ③ 熱輸送は高さ分散を持つ場合に約10%増加する。運動量輸送に比べて差が縮小したのは、増加した運動量輸送が多く熱を輸送するポテンシャルを持つものの、その盛んな輸送が地表面の温度上昇を抑えるフィードバックがはたらいたためであると考えられる。
 - ④ 熱粗度は両サイトでほぼ同じ傾向であり、風向変化にも敏感でない。運動量粗度と熱粗度の比は建物高さのばらつきに関わらず粗度レイノルズ数によって1つの式で表現することが可能であると考えられる。
- 以上のことから、都市計画における建物の高さ分散の

有無に関していくつかの提言ができる。

- 建物間に高さ分散を与えることによりキャノピー内の温度上昇が抑えられる。
- 都市景観の向上という観点からスカイラインを揃えるために高さの均一な建物を配置することがあるが、上記の昇温抑制効果からスカラーの拡散について類推するとキャニオン内に沈滞しやすい汚染物質の拡散を促進させる点では意図的に建物高さをばらつかせる方が良く予想される。
- 本実験サイトのような低アルベドの都市においては建物高さの分散は上空大気に向けての熱放出を促進させる。

本研究で行った議論は建蔽率が25%という1ケースのみの観測によるものであるが、高さ分散の運動量・熱輸送への影響が無視できないことを示す結果が多数あった。今後は高さ分散の大きさや建蔽率を変化させた場合、さらには構成材料や色合いの違いによる振る舞いを同様に調べ、さらに充実した検討を行っていく必要がある。

謝辞：本研究は科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（代表研究者：神田 学）の財政的支援を受けた。また、本実験を遂行するにあたり愛媛大学 森脇 亮 准教授、および日本工業大学 成田健一 教授には多大なる援助を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Roth, M., and Oke, T. R.: Turbulent transfer relationships over an urban surface. 1: spectral characteristics, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.119, pp.1071-1104, 1993.
- 2) Moriwaki, R., and Kanda, M.: Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO₂ over a suburban area, *J. Appl. Meteor.*, Vol.43, pp.1700-1710, 2004.
- 3) Uehara, K., Murakami, S., Oikawa, S., and Wakamatsu, S.: Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons, *Atmos. Environ.*, Vol.34, pp.1553-1562, 2000.
- 4) Masson, V.: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Bound.-Layer Meteor.*, Vol.94, pp.357-397, 2000.
- 5) Kanda, M., Kawai, T., Kanega, M., Moriwaki, R., Narita, K., and Hagishima, A.: Simple energy balance model for regular building arrays, *Bound.-Layer Meteor.*, Vol.116, pp.423-443, 2005.
- 6) Kawai, T., Kanda, M., Narita, K., and Hagishima, A.: Validation of a numerical model for urban energy-exchange using outdoor scale-model measurements, *Int. J. Climatol.*, Vol.27, pp.1931-1942, 2007.
- 7) 河合 徹, 神田 学: 大規模屋外都市模型実験による熱収支の検討, 水工学論文集, Vol.51, pp.265-270, 2007.
- 8) Kanda, M., Kanega, M., Kawai, T., Moriwaki, R., and Sugawara, H.: Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models, *J. Appl. Meteor.*, Vol.46, pp.1067-1079, 2007.
- 9) Inagaki, A., and Kanda, M.: Turbulent flow similarity over an outdoor reduced urban model, *J. Fluid Mech.* (submitted)
- 10) Macdonald, R. W., Griffiths, R. F., and Hall, D. J.: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, Vol.32, pp.1857-1864, 1998.
- 11) Dyer, A. J., and Hicks, B. B.: Flux gradient relationship in the constant flux layer, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.96, pp.715-721, 1970.
- 12) 萩島 理, 谷本 潤, 永山浩二, 古賀正浩: 高さの分布のある直方体粗度群の抗力係数に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.619, pp.39-45, 2007.
- 13) Kanda, M.: Large eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures, *Bound.-Layer Meteor.*, Vol.118, pp.151-168, 2006.
- 14) Roth, M.: Review of atmospheric turbulence over cities, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.126, pp.941-990, 2000.
- 15) Högström, U.: Analysis of turbulence structure in the surface layer with a modified similarity formulation for near neutral conditions, *J. Atmos. Sci.*, Vol.47, pp.1949-1972, 1990.
- 16) Panofsky, H. A., Tennekes, D. H., Lenschow, and Wyngaard, J. C.: The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under the unstable conditions, *Bound.-Layer Meteor.*, Vol.11, pp.355-361, 1978.
- 17) Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Haugen, D. A., Cote, O. R., and Izumi, Y.: Turbulent structure in the convective boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, Vol.33, pp.2152-2169, 1976.
- 18) Brutsaert, W.: *Evaporation into the Atmosphere*, D. Reidel Pub Co., 1982.
- 19) Kawai, T., Mohammad, K. R., and Kanda, M.: Evaluation of simple urban energy balance model using one-year observed fluxes from two different cities, *J. Appl. Meteor.* (submitted)

(2007. 9. 30受付)