一様建物高さ分布で直交配列された街区におけるグロス建蔽率が 熱輸送と運動量輸送に及ぼす影響について

暑熱化都市キャノピー層の熱輸送特性に関する実験的研究（その1）

EFFECTS OF GROSS BUILDING COVERAGE RATIOS ON HEAT AND MOMENTUM TRANSPORT CHARACTERISTICS IN CASE OF URBAN CANOPY LAYER WITH UNIFORM BUILDING HEIGHT AND ALIGNED ARRANGEMENTS

Part 1 Experimental study on heat transport characteristics in heated urban canopy layer

栗田 剛*, 大場 正昭**

Tsuyoshi KURITA and Masaaki OHBA

The increasing height and density of buildings in cities is causing a reduction in wind velocity and an increase in energy consumption, resulting in an increase in waste heat. This is one of the causes warming the urban atmosphere. In order to tackle the aggravated thermal environmental problem of cities, it is important to understand the thermal structure of atmospheric turbulence in heated urban canopy layer. However, knowledge on the transport characteristics of heat flux and momentum flux is still lacking. We investigated the effects of gross coverage building ratios on heat and momentum transport characteristics when urban canopy layer is kept with uniform building height and aligned arrangements using thermally stratified wind tunnel. The obtained results about roughness lengths and bulk transport coefficients related to heat and momentum were compared to actual field results.

Keywords : *Heated urban canopy layer, Aligned arrangement, Gross building coverage ratio, Roughness length for heat, Roughness length for momentum, Bulk transport coefficient*

暑熱化都市キャノピー層, 直交配列, グロス建蔽率, 熱粗度長, 運動量粗度長, バルク輸送係数

1. はじめに

都市では建物の高層・高密度化による風速の弱小化とエネルギー消費の増大による廃熱が顕著であり、そのことが、ヒートアイランド現象と呼ばれる都市大気の高温化を促進する要因となっている。夏季の気温上昇がもたらす空調負荷の増加は、電力消費の年間ピーク値上昇をもたらすために、都市高温化の有効な緩和策が社会的な急務である⁴⁾。深刻化する都市の温熱環境問題に対処するには大気乱流構造を把握することが重要である⁵⁾。近年では地球スケールの気候予測やヒートアイランド現象の予測のために都市キャノピーモデルを利用した数値解析が行われている。計算精度向上のためには都市キャノピーモデルの精度向上が必要であり、都市域における乱流構造や地表面パラメータと運動量や熱の輸送特性の関係を把握することが重要である。しかし熱と運動量の輸送特性や地表面パラメータの知見は十分であるとは言えない^{6),7)}。

神田らは都市気象のモデル精度向上のための包括的なデータ取得を目的として、都市スケールモデルを屋外に設置して様々な観測を

行っている。その中で、エネルギー収支や境界層中の乱流構造・統計量、建物幾何形状の違いが運動量や物質の交換効率に及ぼす影響を明らかにしている⁸⁾。しかし、同様の結果はまだ多くなく、特に熱粗度のデータは室内・室外を問わず極めて少なく、数値モデルと比較しうる物理データが決定的に不足している⁹⁾。

萩島らは、直方体模型群を使用した風洞実験により、粗度配列条件による流れ場の変化と床面抗力係数および気流性状について考察を行い、粗度配列や高さ分布とバルクの床面抗力係数の関係について調べている¹⁰⁾。また、成田らは、濾紙蒸発法を利用した風洞実験により、2次元キャノピーや3次元キャノピー各面の物質伝達率を示している¹¹⁾。しかし、いずれも流れ場が中立であり、また運動量と熱量の輸送を同時に求めた検討はなされていない。

筆者らは大気不安定時の接地境界層を模擬した風洞実験から運動量フラックスや熱フラックスの鉛直分布の特性や風速と温度の鉛直分布から運動量粗度長や熱粗度長を求め、それらの比と粗度レイノルズ数との関係を明らかにした^{*1)}。

本稿は2009年度日本建築学会大会で発表した文献*3)に加筆・修正を加えたものである。

* 東京工芸大学大学院工学研究科 大学院生・修士(工学)
(櫛風技術センター)

** 東京工芸大学工学部建築学科 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Eng., Tokyo Polytechnic University, M. Eng.
(Wind Engineering Center CO., LTD.)

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tokyo Polytechnic University, Dr. Eng.

図1 温度成層風洞

表1 実験条件

Case	1	2	3	4	5
λ [%]	11	15	20	25	31
U_δ [m/s]	0.99	1.03	1.04	1.14	1.14
Re_δ	9868	10283	10440	11424	11355
R_{ib}	-0.153	-0.145	-0.139	-0.118	-0.121
Z_δ [m]	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
$T_\delta - T_s$ [K]	-29.91	-30.78	-30.42	-31.14	-31.43

本報では、暑熱化した都市街区におけるグロス建蔽率の違いによる熱輸送と運動量輸送への影響を明らかにするために、都市街区を想定した直方体ブロック模型を用いて都市キャノピー層流れを再現した風洞実験により街区内外の風速と温度を同時測定し、熱輸送と運動量輸送の特性について検討を行った^{*3)}。

2. 実験概要

風洞は東京工芸大学所有の温度成層風洞^{*2)}を用いた。図1に風洞の外観を示す。測定部は高さ1.0m、幅1.2m、長さ9.4mである。表1に実験条件、図2に実験の概略図、写真1にグロス建蔽率20%における街区模型の設置状況を示す。気流は、気流冷却装置温度を10℃、床面パネル加熱冷却装置温度を60℃に設定して不安定流れを作成した。街区模型は幅、奥行(D)0.05m×高さ(H)0.05mのアルミブロックを測定洞全面に並べて作成した。熱放射率を均一にするため測定洞床面およびブロック表面は黒色仕上げとした。ブロックの配列は直交配列とした。ブロックの設置長さは、萩島らのフェッチ長さ120Hを参考にし約128Hとした¹⁰⁾。測定域での境界層高さの一様性から十分なフェッチ長さが確保されていると考えられる。街区のグロス建蔽率 λ は街路幅Wによって変化させ、11, 15, 20, 25, 31%の5種類とした。測定点は、測定洞入り口から6,375mm下流のブロック間の中央において、鉛直方向に52点設定した。大気安定度はバルクリチャードソン数 R_{ib} を指標とし、速度境界層高さ Z_δ の値を用いて求めた。 R_{ib} は-0.12から-0.15の範囲であった。モニン・オブコフ長さをを用いた Z_δ の大気安定度 $-Z/L$ は老川らの札幌での夏季実測結果¹²⁾で示された0.3~3.0の範囲内にあった。気流温度は5 μ mの冷線温度計(DANTEC)、風速はスプリットファイバースロープ(DANTEC)を用いて、温度と風速を同時に測定した。サンプリング間隔は1kHz、収録時間は60秒とした。データは、各高さにおい

図2 実験概略図

写真1 グロス建蔽率20%における街区模型の設置状況

て3回の測定を行い、アンサンブル平均した。熱線風速計および冷線温度計は専用の校正装置¹³⁾を用いて校正した。床表面温度およびブロック表面温度はT型熱電対を測定面に貼り付けて測定した¹⁴⁾。サンプリング間隔は1Hz、収録時間は180秒とした。グロス建蔽率25%における床表面温度は約47℃、ブロック模型表面の温度は側面で約42℃、上面で約44℃であった。表面温度の建蔽率による変化は小さかった。本測定における平均温度と平均風速の不確かさは、田中ら¹³⁾が示したように、平均風速の相対不確かさは強風域で10~13%、弱風域で20%以上、平均温度の相対不確かさは5%以下であると考えられる。

3. 実験結果

3.1 乱流フラックスの時刻歴波形

図3にグロス建蔽率25% (Case4) の場合の $Z/H=1$ および2における運動量フラックス uw と鉛直方向熱フラックス $w\theta$ の時刻歴波形を示す。 uw 、 $w\theta$ ともに、 $Z/H=1$ に比べて $Z/H=2$ のほうが変動の大きさが小さくなっている。これは高さが高くなることでブロックの影響が小さくなっているためである。 $w\theta$ は正側に大きな変動がランダムに現れている。大気不安定時の流れ場では温度勾配が逆勾配であるので、 $w\theta$ の平均値は正の値となる。

3.2 パワースペクトル密度およびコスペクトル密度

パワースペクトル密度の無次元化は接地層のモニン・オブコフ相似則の慣習に従い¹⁵⁾、摩擦速度 u_* と摩擦温度 T_* を用いた。また、相似関数 ϕ_ϵ 、 ϕ_h は次式を用いた¹⁵⁾。

$$\phi_\epsilon = (1 + 16|z/L|^{2/3})^{3/2} \quad (1)$$

(a) 運動量フラックス uw ($Z/H=1$)

(b) 鉛直方向熱フラックス $w\theta$ ($Z/H=1$)

(c) 運動量フラックス uw ($Z/H=2$)

(d) 鉛直方向熱フラックス $w\theta$ ($Z/H=2$)

図3 グロス建蔽率25%における運動量フラックスと熱フラックスの時刻歴波形

図4 u成分のパワースペクトル密度の高さ方向変化 (Case4)

図5 各成分のパワースペクトル密度 (Case4, $Z/H=2$)

図6 u成分のパワースペクトル密度のグロス建蔽率による変化 ($Z/H=2$)

図7 uw と $w\theta$ のコスpectrum密度 (Case4, $Z/H=2$)

図8 平均風速の鉛直分布

図9 平均温度の鉛直分布

$$\phi_h = (1 + 16|z/L|)^{-1/2} \quad (2)$$

図4にグロス建蔽率25% (Case4) の場合の水平方向変動風速 (u 成分) のパワースペクトル密度の高さ方向変化を示す。 u 成分のパワースペクトル密度は、高さの増加とともに全体的に小さくなって

いる。高周波数側の減衰の勾配は高さによらず同様であった。減衰の勾配は、接地境界層のパワースペクトル密度で示されている $-2/3$ 乗とほぼ同様であった。図5にグロス建蔽率25% (Case4) の場合の高さ $Z/H=2$ における水平方向変動風速 (u 成分)、鉛直方向変動風速 (w 成分)、変動温度 (θ 成分) のパワースペクトル密度を示

図 10 運動量フラックスの鉛直分布

図 11 鉛直方向熱フラックスの鉛直分布

図 12 モニン・オブコフ長さの鉛直分布

す。w 成分は、u 成分に比べて低周波数成分が小さく、卓越周波数も高周波数側に見られた。高周波数側の減衰の割合は u 成分、w 成分ともほぼ同様であった。θ 成分は、u 成分の卓越周波数付近に卓越周波数が見られた。これは θ 成分が u 成分の変動に影響されていることを示している。図 6 に高さ Z/H=2 における水平方向変動風速 (u 成分) のパワースペクトル密度のグロス建蔽率による変化を示す。全体的な傾向として建蔽率が小さいほど低周波数領域のパワースペクトル密度が小さな値を示した。高周波数領域はグロス建蔽率によらずほぼ同じ値となった。図 7 にグロス建蔽率 25% (Case4) の場合の高さ Z/H=2 における運動量フラックス uw と鉛直方向熱フラックス $w\theta$ のコスペクトル密度を示す。熱フラックスの卓越周波数は運動量フラックスに比べて高周波数側に見られた。また、高周波数側の減衰の傾きは、熱フラックスのほうがやや緩やかであった。

各成分のパワースペクトル密度、コスペクトル密度は建蔽率を変化させた場合でも同様の傾向を示した。ブロック模型高さの影響が低下した上空では、Kaimal 実測の接地境界層における性状と同様の傾向を示した¹⁵⁾。

3.3 鉛直分布

図 8 に水平方向平均風速 U の鉛直分布を示す。速度境界層高さは平均風速の鉛直分布がほぼ一定の値になった高さとし、いずれのグロス建蔽率においても Z/H=3 であった。風速の増加割合は、グロス建蔽率が大きいほど増加の割合が大きかった。グロス建蔽率による違いは Z/H=2 程度まで見られた。いずれのグロス建蔽率においても床面付近まで風速が減少しており、ゼロ面変位はほぼ 0 であった。Macdonald は粗度要素とゼロ面変位の関係を示している¹⁶⁾が、今回の測定点は街路上に設定したので、ゼロ面変位に対するグロス建蔽率の影響が非常に小さかったと考えられる。図 9 に気流平均温度 T と境界層高さ温度 T_δ の差の鉛直分布を示す。温度境界層高さは速度境界層高さと同様であった。温度差はグロス建蔽率が大きいほど大きな値を示し、Z/H=2 より上空ではグロス建蔽率による差は小さかった。グロス建蔽率が小さいほうが地表面付近の風速が速いため温度差が小さくなると考えられる。図 10 に運動量フラックス $-uw$ の鉛直分布を示す。運動量フラックスは、Z/H=1 付近まで増加したが、それ以上の高さではほぼ一定の値を示した。Z/H=1 以下ではグロス建蔽率の違いは見られないが、Z/H=1 以上では、グロス建蔽率が小さいほうが大きな値を示す傾向が見られた。接地境界層の定義

図 13 モニン・オブコフ相似則に基づく鉛直分布の近似結果

はフラックスの鉛直分布がほぼ一定の範囲であるので、本実験における接地境界層の再現範囲は Z/H=1~3 と考えられる。図 11 に熱フラックス $w\theta$ の鉛直分布を示す。鉛直方向熱フラックスは運動量フラックスと同様に Z/H=1 付近まで増加し、それ以上の高さではほぼ一定の値を示した。Z/H=1 以上でのグロス建蔽率の違いによる値の違いは運動量フラックスほど大きくなかった。図 12 にモニン・オブコフ長さ L の鉛直分布を示す。床面近傍では $-uw$ が負になったので算出できなかった。モニン・オブコフ長さは、運動量フラックスの分布と同様の傾向を示した。Z/H=3 までの Z/L は 0 から -1 の範囲であった。

上述した乱流フラックスと鉛直分布の気流特性のもとで次の検討を行った。

4. モニン・オブコフ相似則に基づく風速の鉛直分布と温度の鉛直分布の近似

広い平坦地における接地境界層の平均風速と平均温度の鉛直分布は、モニン・オブコフの相似則を仮定してそれぞれ式(3)と式(4)で表される^{17), 18)}。Ψ は Z/L をパラメータとする積分普遍関数で、Dyer と Hicks は乱流フラックスとプロファイルの観測から不安定流れの $0 > Z/L > -1$ の条件下で式(5)~式(7)を提案している^{19), 20), 21)}。

$$U = \frac{u_*}{k} \left\{ \ln \frac{Z'}{Z_0} - \psi_M \left(\frac{Z'}{L} \right) \right\} \quad (3)$$

$$T_s - T = -\frac{T_s}{k} \left\{ \ln \frac{Z'}{Z_T} - \psi_H \left(\frac{Z'}{L} \right) \right\} \quad (4)$$

$$\psi_{M,H} \left(\frac{Z'}{L} \right) = \int_0^{Z'/L} \frac{1 - \phi_{M,H}}{Z'/L} d \left(\frac{Z'}{L} \right) \quad (5)$$

$$\phi_M = \left(1 - 16 \frac{Z'}{L} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (6)$$

$$\phi_H = \left(1 - 16 \frac{Z'}{L} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

ここで、 $Z' = Z - d$

運動量粗度長 Z_0 および温度粗度長 Z_T 、摩擦速度 u_* 、摩擦温度 T_s の推定は、前章で示した平均風速の鉛直分布と平均温度の鉛直分布を式(3)と式(4)で最小自乗近似する直接的な方法で行った。式(5)～式(7)のモニン・オプコフ長さは各ケースとも $Z/H=2$ の値とした。近似の範囲は、運動量フラックスが高さ方向に一定の範囲である $Z/H=1 \sim 3$ とした。ゼロ面変位は平均風速の鉛直分布形状から 0 とした。図 13 に平均風速および床表面温度と気流平均温度の差の近似結果の一例を示す。式(3)と式(4)は $Z/H=1 \sim 3$ の範囲で平均風速、平均温度をともによく近似した。

5. 運動量粗度長と熱粗度長の比 KB^{-1} の推定

表 2 に運動量粗度長、熱粗度長および粗度レイノルズ数 Re^* を示す。粗度レイノルズ数は式(8)、運動量粗度長と熱粗度長の比 KB^{-1} は式(9)により求めた。熱粗度長は運動量粗度長に比べて 1 桁小さかった。粗度レイノルズ数は 26～116 の範囲にあった。Snyder や上原が風洞実験で求めた最小レイノルズ数は 2.5～5.4 であり^{22), 23)}、本実験の粗度レイノルズ数は十分大きな値を示した。図 14 に運動量粗度長と熱粗度長の比 KB^{-1} と粗度レイノルズ数の関係を示す。図中の点線は Brutseart による bluff-rough な地表面での実験結果²¹⁾、実線は神田らによる都市縮尺模型 COSMO（グロス建蔽率 25%）の実測結果²⁴⁾である。回帰式(10)の係数 a の値は Brutseart が 2.46、COSMO が 1.29 である。粗度レイノルズ数はグロス建蔽率の増加とともに増加した。 KB^{-1} はグロス建蔽率の増加とともにやや減少した。グロス建蔽率 20、25% では、COSMO で得られた回帰式に近い値を示した。

$$Re^* = \frac{u_* \cdot Z_0}{\nu} \quad (8)$$

$$KB^{-1} = \ln \left(\frac{Z_0}{Z_T} \right) \quad (9)$$

$$\ln \left(\frac{Z_0}{Z_T} \right) = a (Re^*)^{0.25} - 2 \quad (10)$$

6. バルク輸送係数とグロス建蔽率の関係

接地境界層の運動量フラックス M はバルク輸送方程式を用いて次式で表される⁹⁾。

表 2 運動量粗度長、熱粗度長および粗度レイノルズ数

Case	1	2	3	4	5
λ [%]	11	15	20	25	31
z_0 [m]	3.48E-03	5.63E-03	7.94E-03	8.38E-03	8.76E-03
z_T [m]	4.26E-04	6.62E-04	1.52E-03	1.99E-03	3.42E-03
u_* [m/s]	0.12	0.14	0.17	0.19	0.20
T_s [K]	-2.33	-2.63	-3.22	-3.49	-4.48
L [m]	-0.89	-0.85	-0.78	-0.88	-0.58
Re^*	26.70	52.90	87.98	102.72	116.36
KB^{-1}	2.10	2.14	1.66	1.44	0.94

図 14 運動量粗度長と熱粗度長の比 KB^{-1} と粗度レイノルズ数の関係

図 15 バルク運動量輸送係数とグロス建蔽率の関係

図 16 バルク熱輸送係数とグロス建蔽率の関係

$$M = \rho u_*^2 = \rho C_m U^2 \quad (11)$$

バルク運動量輸送係数 C_m は 式(3)と式(11)より次式で表される。

$$C_m = \left[\frac{1}{k} \cdot \left\{ \ln \frac{Z'}{Z_0} - \psi_M \left(\frac{Z'}{L} \right) \right\} \right]^{-2} \quad (12)$$

また、熱フラックス HF も同様にバルク輸送方程式を用いて次式で表される⁹⁾。

$$HF = -\rho C_p u_* T_* = \rho C_p C_h U (T_s - T) \quad (13)$$

バルク熱輸送係数 C_h は式(3)、(4)および(13)より次式で表される。

$$C_h = \left[\frac{1}{k} \cdot \left\{ \ln \frac{Z'}{Z_0} - \psi_M \left(\frac{Z'}{L} \right) \right\} \right]^{-1} \cdot \left[\frac{1}{k} \cdot \left\{ \ln \frac{Z'}{Z_T} - \psi_H \left(\frac{Z'}{L} \right) \right\} \right]^{-1} \quad (14)$$

図 15 にバルク運動量輸送係数 C_m とグロス建蔽率 λ の関係を示す。 C_m は表 2 に示す数値を式(12)に代入して求めた。図中の実線は大気安定度が中立の場合の C_m を Macdonald らの式¹⁰⁾を用いて求めたものである^{注1)}。 C_m の値はグロス建蔽率の増加とともに増加している。グロス建蔽率 11% では中立時と同程度であるが、15% より大きなグロス建蔽率では中立時に比べて大きな値を示した。図 16 にバルク熱輸送係数 C_h とグロス建蔽率 λ の関係を示す。 C_h は表 2 に示す数値を式(14)に代入して求めた。図中の実線は大気安定度が中立の場合の C_h を Macdonald らの式¹⁰⁾と式(10)を用いて求めたものである^{注2)}。 C_h の値はグロス建蔽率の増加とともに増加している。神田らの結果と同様に C_m に比べると C_h のグロス建蔽率に対する感度は小さかった。今回の測定では、熱輸送が必ずしもグロス建蔽率に鈍感であるという明確な結果は得られなかった⁸⁾。

7. 結語

本研究では、暑熱化した都市街区におけるグロス建蔽率の違いによる熱輸送と運動量輸送への影響を調べる目的で、直交配列で一様建物高さ分布の都市街区を対象とした風洞実験を行い、グロス建蔽率と熱輸送、運動量輸送の関係を検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 都市キャノピー層の風速と温度の鉛直分布を、モニン・オプロフ相似則に基づいて対数近似することにより、暑熱化都市キャノピー層の運動量粗度長と熱粗度長に関する実験データを取得した。熱粗度長は運動量粗度長に比べて約 1 桁小さかった。
- 2) 実験したグロス建蔽率と直交配列の範囲では、グロス建蔽率の増加とともに運動量粗度長と熱粗度長の比 KB^1 が減少する傾向を示した。
- 3) 一様建物高さ分布で直交配列された街区におけるバルク運動量輸送係数 C_m は、グロス建蔽率の増加とともに増加する傾向を示した。バルク熱輸送係数 C_h も同様にグロス建蔽率の増加とともに値が増加したが、 C_m に比べるとグロス建蔽率に対する感度は小さかった。

今後、街区配列や高さ分布の異なるケースについて都市街区の熱輸送特性に着目した検討を行い、熱粗度長、バルク輸送係数のデータ蓄積を図る予定である。

謝辞

本研究は東京工芸大学大学院工学研究科建築学専攻の 21 世紀 COE プログラムおよびグローバル COE プログラム（代表 田村幸雄）による助成を得た。風洞実験は東京工芸大学の卒論生に協力頂いた。ここに記して感謝する。

注

注 1)

大気安定度が中立でゼロ面変位がある場合のバルク運動量輸送係数 C_m は次式で表される⁹⁾。

$$C_m = \left[\frac{1}{k} \cdot \left\{ \ln \frac{Z-d}{Z_0} \right\} \right]^{-2} \quad (15)$$

ここで、ゼロ面変位 d と運動量粗度 Z_0 は Macdonald が提案した式(16)と式(17)を用いた¹⁰⁾。

$$\frac{d}{H} = 1 + A^{\lambda} (\lambda - 1) \quad (16)$$

ここで、 A は形状係数で、直交配列時の値 $A=3.59$ とした。

$$\frac{Z_0}{H} = \left(1 - \frac{d}{H} \right) \exp \left[- \left(0.5 \beta \frac{C_D}{k^2} \left(1 - \frac{d}{H} \right) \lambda_f \right)^{0.5} \right] \quad (17)$$

ここで、 β は鉛直分布係数、 C_D は抗力係数、 λ_f は見付面積係数であり、それぞれ $\beta=0.55$ 、 $C_D=1.2$ 、 $\lambda_f=\lambda$ とした。式(15)に式(16)と式(17)を代入して、図 15 の実線を求めた⁹⁾。

注 2)

同様に大気安定度が中立の場合のバルク熱輸送係数 C_h は次式で表される⁹⁾。

$$C_h = \left[\frac{1}{k} \cdot \left\{ \ln \frac{Z-d}{Z_0} \right\} \right]^{-1} \cdot \left[\frac{1}{k} \cdot \left\{ \ln \frac{Z-d}{Z_T} \right\} \right]^{-1} \quad (18)$$

式(18)に式(16)、式(17)および式(10)を代入し、式(10)の係数を $a=1.29$ として、図 16 の実線を求めた⁹⁾。

本論文に関する既発表文献

- *1) 栗田、大場：大気不安定時の接地境界層流れの鉛直プロファイル特性について、第 20 回風工学シンポジウム論文集、pp.7-12, 2008.12
- *2) 大場、栗田他：室内回流式エッフェル型温度成層風洞の紹介、日本風工学会誌、No.88, pp.73-80, 2001.7
- *3) 栗田、大場：都市キャノピー層を対象とした温度と風速の特性に関する実験的研究(その 4) 運動量粗度長と熱粗度長の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 (D-1), pp.961-962, 2009.8

参考文献

- 4) 萩島、谷本他：改良・建築—都市—土壌連成系モデル (AUSSSM) による都市高温化の構造解析 第 1 報モデルの理論構成及び標準解、日本建築学会計画系論文集、No.550, pp.79-86, 2001.12
- 5) 丸山、稲垣、神田：大気接地境界層乱流における内部・外部スケールの乱流構造特性、土木学会水工学論文集、52, 2008.3
- 6) 森泉、河合他：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、土木学会水工学論文集、52, 2008.3
- 7) Cheng H, Castro IP: Near wall flow over urban-like roughness, Boundary-Layer Meteorology, No.104, pp.229-259, 2002
- 8) 神田、稲垣：屋外都市スケールモデル実験 COSMO のねらいと効果、日本風工学会誌、Vol.33, No.117, pp.299-306, 2008.10
- 9) M. Kanda, T. Moriizumi: Momentum and Heat Transfer over Urban-like Surfaces, Boundary-Layer Meteorology, Vol.131, No.3, pp.385-401, 2009.06
- 10) 萩島、谷本他：高さの分布のある直方体粗度群の抗力係数に関する風洞実験、日本建築学会環境系論文集、No.619, pp.39-45, 2007.9
- 11) 成田、野々村他：都市表面における対流物質伝達率に関する風洞実験—都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その 2)—、日本建築学会計画系論文集、No.527, pp.69-76, 2000.1
- 12) 老川、若松他：都市郊外における乱れの観測、第 12 回風工学シンポジウム論文集、pp.37-42, 1992.12
- 13) 田中、義江他：逆流を伴う非等温流れ場における風速・温度・濃度の同時測定方法、日本建築学会環境系論文集、Vol.73, No.628, pp.799-806,

2008.6

- 14) 宮野, 小林: 熱電対による表面温度測定について, 日本建築学会計画系論文集, No.253, pp.81-89, 1977.3
- 15) J. C. Kaimal: 微細気象学, 技報堂, 1993
- 16) R. W. Macdonald, R. F. Griffiths, and D. J. Hall: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, Atmos. Environ., Vol.32, pp.1857-1864, 1998
- 17) D. Randerson; Atmospheric Science and Power Production, U.S. Department of Energy, pp.171, 1984
- 18) Shaomin Liu et al.: Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements, Hydrol. Earth Syst. Sci., Vol.11, pp.769-783, 2007
- 19) A. J. Dyer and B. B. Hicks: Flux-gradient relationships in the constant flux layer, Quart. J. R. Met. Soc., Vol.96, pp.715-721, 1970
- 20) A. J. Dyer: A review of flux-profile relationships, Boundary-Layer Meteorology, Vol.7, pp.363-372, 1974
- 21) W. Brutseart: Evaporation into the Atmosphere, D. Reidel Pub Co., 1982
- 22) W. H. Snyder: Similarity criteria for the application of fluid models to the study of air pollution meteorology, Studies on critical Reynolds number indices for wind-tunnel experiments on flow within urban areas, Boundary-Layer Meteorology, Vol.3, pp.113-134, 1972
- 23) K. Uehara et al.: Studies on critical Reynolds number indices for wind-tunnel experiments on flow within urban areas, Boundary-Layer Meteorology, Vol.107, pp.353-370, 2003
- 24) M. Kanda et al.: Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models, J. Appl. Meteor., Vol.46, pp.1067-1079, 2007

主な記号

Z : 測定高さ	[m]
λ : グロス建蔽率	
$\left(\lambda = \frac{D^2}{(D+W)^2} \right)$	
W : 街路幅	[m]
D : 模型幅	[m]
H : 模型高さ	[m]
Z_δ : 速度境界層高さ	[m]
U_δ : 速度境界層高さの風速	[ms ⁻¹]
Re_δ : 速度境界層高さのレイノルズ数	
$\left(Re_\delta = \frac{U_\delta \cdot \delta}{\nu} \right)$	
ν : 動粘性係数	[m ² s ⁻¹]
R_{ib} : バルクリチャードソン数	
$\left(R_{ib} = \frac{g \cdot z_\delta (T_\delta - T_s)}{T_0 \cdot U_\delta^2} \right)$	
g : 重力加速度	[ms ⁻²]
T_δ : 温度境界層高さの温度	[K]
T_s : 床面温度	[K]
T_0 : 床面から Z_δ までの平均温度	[K]
T : 平均温度	[K]
θ : 変動温度	[K]
U : 主流方向平均風速	[ms ⁻¹]
u, w : 主流方向, 鉛直方向変動風速	[ms ⁻¹]
uw : 鉛直方向運動量フラックス	[m ² s ⁻²]
w θ : 鉛直方向熱フラックス	[Kms ⁻¹]

f : 周波数	[Hz]
Si(f) : i 成分のパワースペクトル密度	[m ² s ⁻¹]
Ci(f) : i 成分のコスベクトル密度	[m ² s ⁻¹], [Km]
L : モニン・オブコフ長さ	[m]
$\left(L = - \frac{\left(\overline{uw} \right)^2 T}{k \cdot g \cdot w \theta} \right)$	
u_* : 摩擦速度	[ms ⁻¹]
T_* : 摩擦温度	[K]
Z_0 : 運動量粗度長	[m]
Z_T : 熱粗度長	[m]
d : ゼロ面変位	[m]
k : カルマン定数(=0.4)	
$Z' = Z - d$	[m]
C_m : バルク運動量輸送係数	
C_h : バルク熱輸送係数	
C_p : 定圧比熱	[JKg ⁻¹ K ⁻¹]
ρ : 空気密度	[Kgm ⁻³]

(2009年10月9日原稿受理, 2010年3月1日採用決定)