

住宅キャノピー層内外の風・熱収支解析

Numerical Analyses of Wind and Heat Balances for Residential Canopy Layer

藤野 毅¹・浅枝 隆²・ヴ タンカ³

Takeshi FUJINO, Takashi ASAEDA and Vu Thanh CA

¹正会員 学博 埼玉大学助手 大学院理工学研究科 (〒338浦和市下大久保255)

²正会員 工博 埼玉大学助教授 大学院理工学研究科 (〒338浦和市下大久保255)

³正会員 学博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科 (〒338浦和市下大久保255)

Sensible heat flux of urban canopy layer were estimated by a numerical model which was developed by adding the effect of urban building canopies to a meso-scale turbulent closure model. The model was tested with different kinds of canopy density. The Results of computations indicated that the sensible heat flux at road surface and roof surface depend much on the building density and wind field within the canopy layer.

The results also indicates that the numerical model is needed for understanding the real heat balances, and wind and temperature filed.

Key Words : Urban Canopy Layer, Heat Balance, Sensible Heat Flux, Numerical Analyses

1. はじめに

都市の熱環境を評価するにあたっては、まず、都市表面の熱収支を算定することが極めて重要である^{1,2)}。さらに、建物や植生といった様々な事物によって特有の気候が形成されるいわゆる都市キャノピー層が存在するが、この特性は都市の構成物質の熱的な性質とキャノピー層内外の気流の影響のもとに多様に変化する。このような熱環境は、極めて身近で、人体にも直接影響する最も重要な部分であるものの、既存のメソ気象モデルでは十分に再現することはできない。従って、このような都市の微気候を解析するには両者の相互作用を考慮したモデルでなければならない。筆者らは、既存のメソスケール気象モデルを街区スケールの微気候の特性をより詳細に再現するために、建物・森林キャノピーの効果を取り入れたモデルを開発した³⁾。

本研究は、住宅キャノピー層内外を対象に行った気象観測結果を用いながら、建物密度が変化することによって、どの程度都市地表面からの熱収支、および気流に変化をもたらすのかを数値計算によって見積もり、都市キャノピー層内外の微気

象の特性について考察を加えたものである。

2. 野外観測

観測は、97年8月の晴天日において、滋賀県長浜市内にある市街地を対象に行った。ここで、都市キャノピー内の熱収支観測の実例としては、神田ら(1997)⁴⁾による銀座での観測があり、そこでは人工熱、及び人工的な潜熱が都市の熱収支特性として顕著に現れることを指摘している。しかしながら、本観測現場は、そのほとんどが2階建ての民家で構成されており、車の通りも少ない。従って、議論も単純にするためにここでは今後解析も含めて、これらの「人工的」なものは無視して考える。

観測項目を表-1に記す。まず、図-1に建物平均高さ($H=7\text{ m}$)のほぼ2倍の高さでの風速を基準に取った日中の風速のプロファイルを示す。ここで、キャノピー内での風速は主風向に沿った幅6 mの道路上で計測されたものである。これらより、平均風速のプロファイルはばらつきが小さく建物キャノピー層とその上の境界層とでそれぞれ異なった対数分布で近似されるような都市キャノピー層内外の典型的な分布が得られた⁵⁾。

表-1 観測項目・測定条件

項 目	設置場所 高 度(m)	記録間隔 (時間)
日射・赤外放射 (EKO)	屋根面 10.5	1 (min.)
気温 (サーミスタ ,ESPEC)	地上 1.5, 10, 14	1 (min.)
風速 (熱線風速計 ,KANOMAX)	2.0, 4.0, 6.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 15.0	4(sec.) 10min. 日中2時間 おき
表面温度 (熱電 対,CHINO)	アスファルト面・ 瓦屋根面	1 (min.)

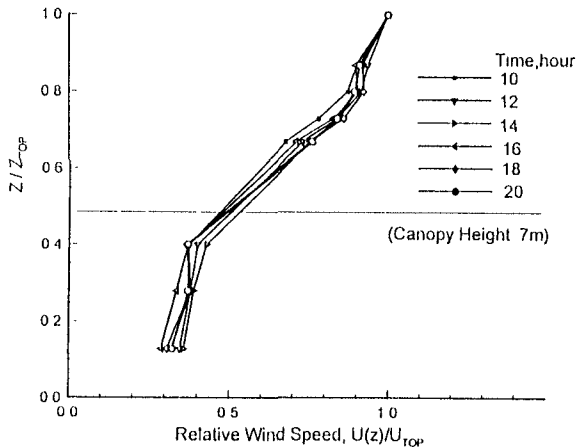


図-1 風速のプロファイル(観測値)

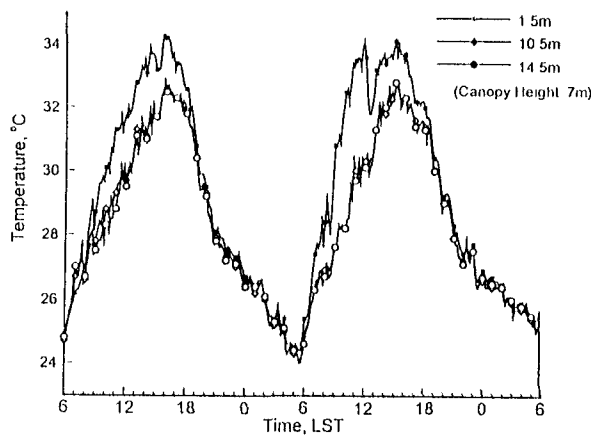


図-2 気温の日変化(観測値)

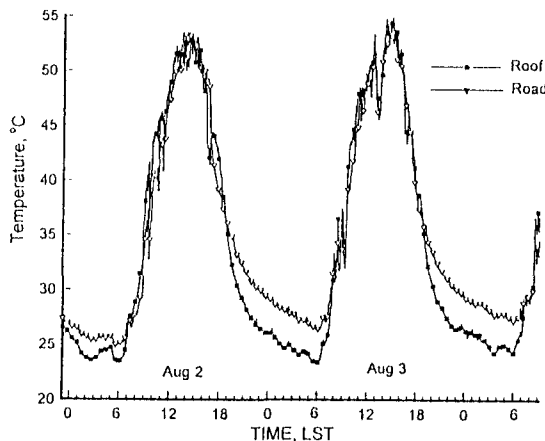


図-3 地表面・屋根面温度の日変化(観測値)

図-2に、キャノピー層内とその上の境界層における気温の日変化を示す。これらより、日中では、キャノピー内の気温が常に高く、9 mの高さの間で気温差は最大2度程度にまで達した。ここで、日中では、琵琶湖からの湖風が入ってきているため、特に上の境界層では移流による影響も受けている。このように、7 mの比較的低いキャノピー層であるが、熱環境は上と下とで大きく異なることがわかる。

最後に図-3に、道路面と屋根面温度の日変化を示す。これらより、両者ともに日中50度以上の高温となるが、夜間では屋根面が特に低くなる傾向がわかった。

3. 計算方法

(1) 気流・熱収支関連の支配方程式

計算は浅枝ら(1997)³⁾による建物キャノピーモデルを用いた。大気の流れ、熱、及び水蒸気(ここでは特に取り扱わない)の基礎方程式はYamada(1982)⁶⁾の乱流モデルに準ずる。ここでは、キャノピーの計算に直接関係する項および方程式のみを記す。

まず、住宅キャノピーの流れに及ぼす効果は、風速の乱流方程式に抗力項を与え、次式で見積もった。

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = C_d U_i |U_i| \quad (1)$$

ここで、 C_d は抗力係数を示し、本計算では便宜上、

$$C_d = 0.2 \rho_r \quad (2)$$

とした。ここで、 ρ_r は単純に建物の単位面積あたりに占める割合(%)と定義し、解析を行う。

次に、地表面、屋根面、壁面の表面温度の算定にはそれぞれ表面の熱収支式、

$$-\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial z_c} = R_{Nc} + H_c \quad (3)$$

および、熱伝導方程式、

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\lambda_c}{\rho C_c} \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \quad (4)$$

を解くことによって得られる。ここで、ビル表面の正味放射は、次式のようにになる。

$$R_{Nc} = (S + s\psi_{sky \rightarrow A})(1 - \alpha_A) + R_a\psi_{sky \rightarrow A} + \sum_i (S_i + s_i\psi_{sky \rightarrow i})\alpha_i\psi_{i \rightarrow A} + \sum_i R_i\psi_{i \rightarrow A} - \varepsilon\sigma T_c^{4A} \quad (5)$$

ここで、 T_c は都市地表面(屋根面・道路面・壁面)温度、 λ_c は物体の熱伝導率、 ρC_c は物体の熱容量、 R_{Nc} は放射収支、 H_c は都市地表面からの顕熱輸送量、 S および s は、それぞれ日射の直達および

輸送量、 S および s_i は、それぞれ日射の直達および散乱光成分、 $\Psi_{sky \rightarrow A}$ は点Aからの天空率、 α_A は点Aの表面のアルベド、 R_a は空からの大気放射、 S_i 、 s_i は表面要素 i からの日射の直達および散乱光成分、 α_i は表面要素 i でのアルベド、 $\Psi_{i \rightarrow A}$ は点Aから表面要素 i の見込み角、 R_i は要素 i からの赤外放射量、 ε は表面の射出率、 σ はステファーン-ボルツマン定数を示す。ここで、各面での日射の反射は簡単のため1度だけ生ずるものとして計算を行う。

(2) 計算条件

式(1)から(5)に関する計算に必要なパラメータは、建物密度、各都市構成物質の熱伝導率、熱容量、およびアルベドである。これらのいくつかは代表的な実測値を用い、また不明なものは経験的に決定した。これらの計算に用いたパラメータの一覧を表-2に示す。

大気計算のメッシュは水平方向に5km×10kmの領域を250mの等間隔のメッシュで区切り、鉛直方向には高さ60mまで1.5m間隔、それ以降は不等間隔でだんだん大きくなるように設定し、高さ1000mまでを領域とした。初期値としては計算領域上端において風速3m/sとし、気温および地表面温度は観測値を基に26度、壁面温度は27度、屋根面温度は23度とした。地表面からの顕熱輸送は高さ1mまでをモニンオブコフの相似側が成り立つと仮定し、摩擦温度と摩擦速度の積で算定し、屋根面からの顕熱輸送量はLouis(1979)⁷⁾の算定式を用いた。壁面からの顕熱輸送量は、それぞれの方向の壁面温度を平均し、これを代表温度と定義する。ここで、壁面からの顕熱の輸送係数については不明であるため、ここではバルク式(バルク係数: 0.001)を用いて便宜上見積もった。以上の条件の下、建物密度を0, 10, 20, 40, 60, 80%の6通りにわけて計算を行った。

表-2 計算の条件

項 目	物性値 熱伝導率、熱容量	下端の境界値 (°C)
道路(アスファルト)	0.74(w/m/K) 1.42(J/cm ³ /K)	27.5
屋根(瓦)	0.90(w/m/K) 0.12(J/cm ³ /K)	23.0
壁面(コンクリート)	1.69(w/m/K) 2.37(J/cm ³ /K)	27.0

(アルベドはどれも0.1とした。)

4. 計算結果

以下では、48時間計算した2日目の結果について記す。

(1) 風速・気温の鉛直プロファイル

図-4に各建物密度における正午の風速のプロファイルの計算結果を示す。これより、建物密度

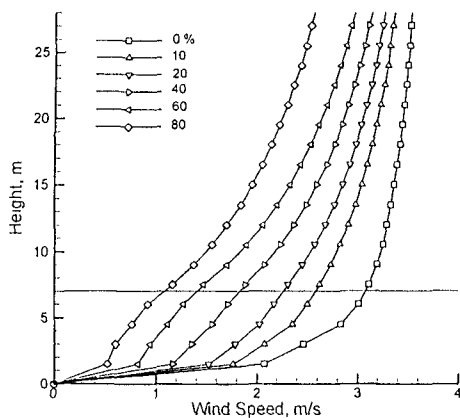
が増加するほど、接地層全体で風速が弱くなり、キャノピー内での風速の勾配も小さくなる。実測では建物密度が40%程度であり、プロファイルの形は再現されている。

図-5に、この時の気温の鉛直プロファイルを示す。これより、建物密度が増加するほど接地層の気温が上昇するが、建物密度80%の場合において、急激に下がる結果を得た。このことについては、後述の放射や熱収支などとともに論ずる。

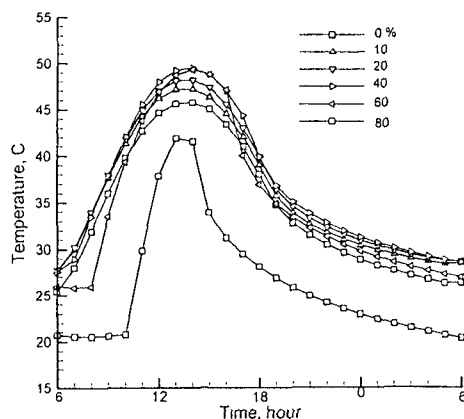
(2) 地表面レベルの風・熱収支・気温

図-6に、地上2mにおける風速の日変化を示す。図-4と同様に、キャノピー密度が高くなるほど風速は下がるが、深夜から明け方にかけて建物無しの落ち込みが最も大きい。これは、大気の安定度の問題による。次に、図-7に、各建物密度における地表面で受ける正味放射量の日変化を示す。これより、建物密度が0から40%の場合では、正味放射は建物の影響をほとんど受けていないように見える。これは、建物の高さが7mと、比較的低い条件で計算を行った場合であるためどの条件にも適するとは言えないが、若干日射が減少した分は壁面からの赤外放射が補っているためと考えられる。60%では日の出からの2時間、さらに80%の場合では4時間程度まで、直達日射が遮られる影響が卓越し、その後急激に増加する。一方、夜間の19時以降では、どの場合においても正味放射量はマイナスとなるが、地面から大気に放出される放射量は、建物密度が大きくなるほど壁面から受ける赤外放射の影響を受けるため、冷却の度合いは小さくなった。特に、建物密度80%では14時に表面温度が急上昇し、なおかつ日陰になったために一時的に正味放射量は負の値をとるが、それ以外では正の値を保ったままである。このように、キャノピー内を代表する放射環境がモデルによってよく表現されている。

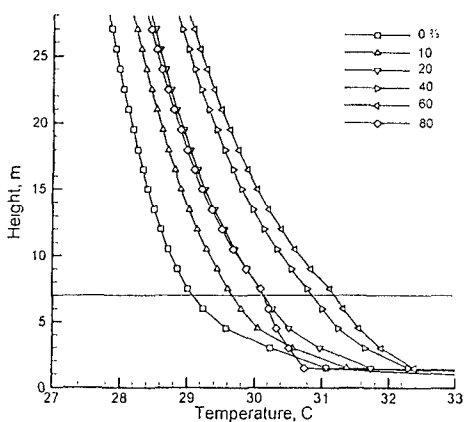
次に、図-8と図-9にそれぞれ地表面温度と地表面からの顕熱輸送量の時間変化を示す。日中の地表面温度は正味放射量の場合と同様、建物密度が40%までは同じような変動が見られ、40%で最高値となる。さらに建物密度が増加すると地上風速が小さくなるだけでなく、正味放射の変動の影響が卓越し、逆に地表面温度は下がる。夜間の0時以降、建物密度80%を除けば建物のある場合の方が無い場合よりも高く維持される。建物密度80%では1日を通して低い温度となる。次に、顕熱輸送量について比較すると、建物の無い場合が最も多く輸送され、建物密度が大きくなるほど輸送量は少なくなった。地表面温度の場合とは異なり、顕熱輸送量は風速差による影響が卓越する結果となった。最後に、図-10に地上気温の日変化を示す。建物の存在により、キャノピー内の気温は建物無し場合と比べ、ほとんどの場合鉛直拡散が弱くなるため高くなる。キャノピー内の気温の日格差は、60%から80%の間で急激に変化した。



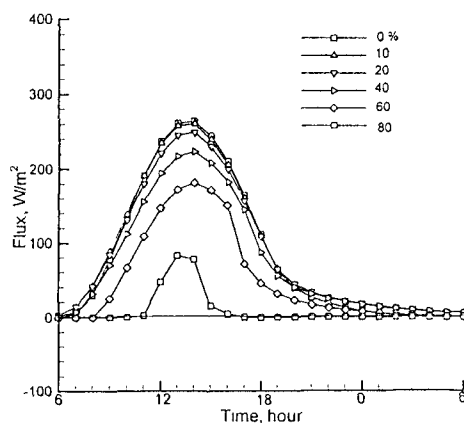
図一 4 風速のプロファイル



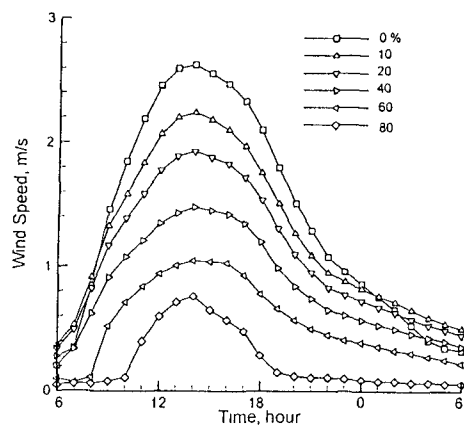
図一 8 地表面温度の日変化



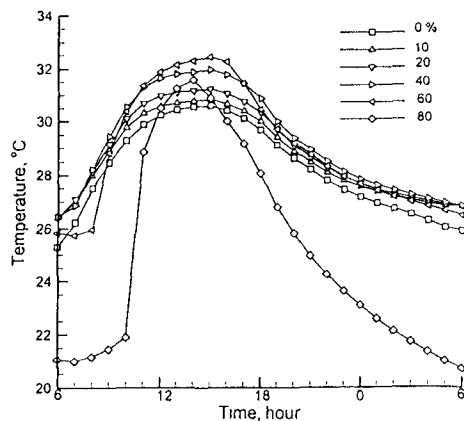
図一 5 気温のプロファイル



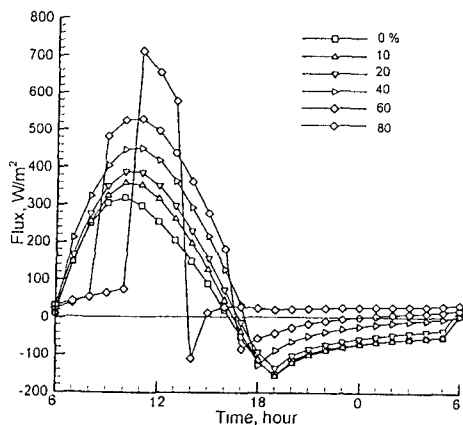
図一 9 顕熱輸送量の日変化



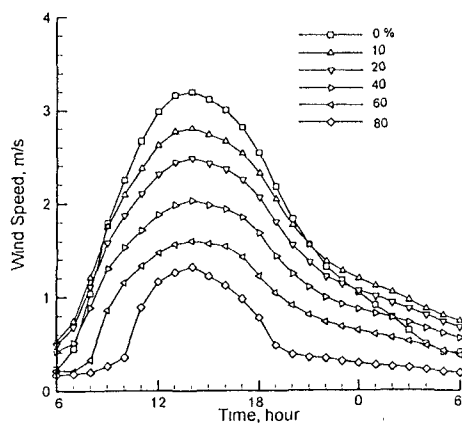
図一 6 地上風速の日変化



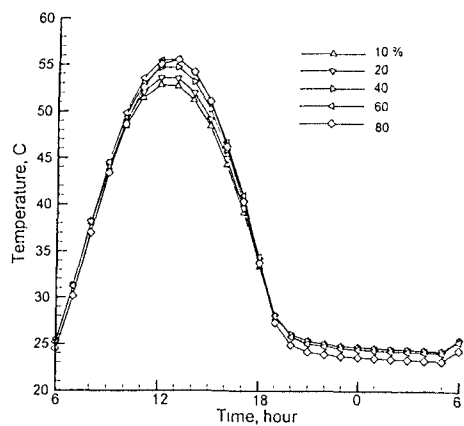
図一 10 地上気温の日変化



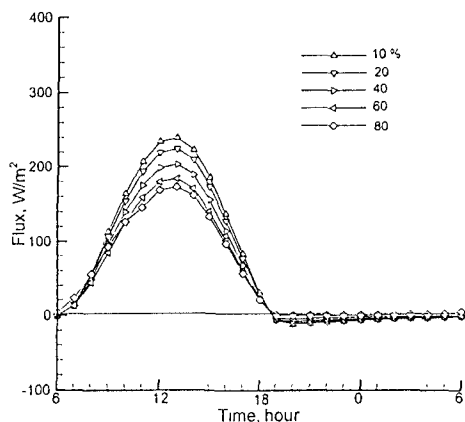
図一 7 地表面の正味放射量



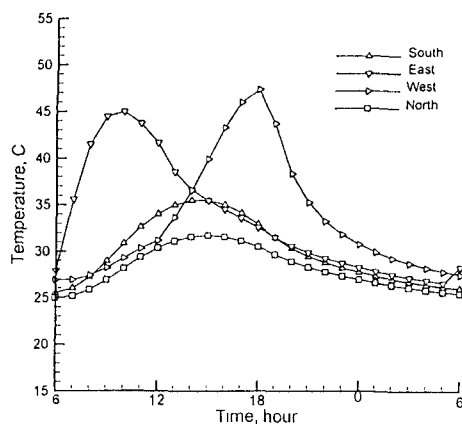
図一 11 屋根面高さの風速の日変化



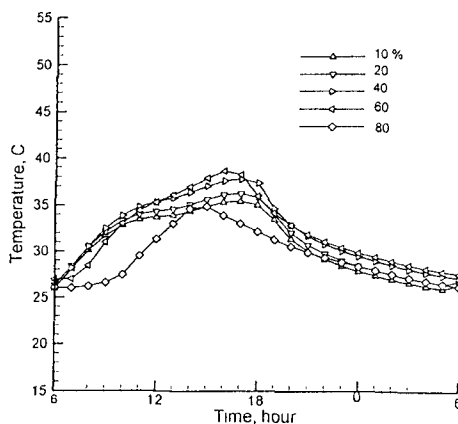
図— 1 2 屋根面温度の日変化



図— 1 3 屋根面からの顕熱輸送量



図— 1 4 壁面温度の日変化 ($\rho_r=0.2$)



図— 1 5 平均壁面温度の日変化

(3) 屋根面レベルの風・熱収支・気温

図— 1 1 に、屋根面上の高さにおける風速の日変化を示す。日変化の傾向は、キャノピー内の場合と同様であり、全体として1.5倍程度増加した。

図— 1 2 に各建物密度における屋根面の温度の日変化を示す。これらより、日中は10%と80%建物密度差間で5度程度の表面温度差が見積もられた。夜間では、風が1m/s以下と弱く、周囲を遮るものがなく、しかも屋根の熱伝導率が小さいことからキャニオン内の気温と比べても3℃以上低く算定なり、地表面、屋根面とも実測値を再現した。

図— 1 3 に、それぞれの場合における屋根面からの顕熱輸送量を示す。これより、日中では建物密度差間で100W/m²程度の差が生じ、建物密度が高くなるにつれて顕熱輸送量は小さくなった。これは屋根面温度が建物密度によって上昇するのは逆の傾向である。この時、建物密度10%の風速に対する80%のそれでは3割程度であったため、顕熱輸送量は気温差よりも風速差に依存している。夜間は、顕熱輸送量は負となるが、傾向は昼間と逆になった。表面温度では、建物密度80%の場合が最も低いのに、顕熱輸送量で見ると負の値が最も小さい。これはキャニオン内の気温を見ると分かるように、他の場合と比べて最も下がっているためである。

(4) 壁面温度の特性

図— 1 4 に、例として建物密度が20%の場合の各方角に向けた壁面温度の日変化を示す。これらより、午前中は東を向いた面で高温となり、夕方は西向きが高温となる。また、北面は日射の直射が無いために最も温度が低い。このような典型的な壁面温度の特性が得られている。ここで、本計算におけるキャノピー内の壁面からの顕熱は、各壁面温度を平均して取り扱う。図— 1 5 に、それぞれの建物密度における壁面温度の平均値の日変化を示す。これらより、平均的には壁面の温度は地表面や屋根面と比較して日変化が小さく、特に、夜間においては建物密度の違いによる温度差が小さい。ここでも、建物密度80%では日射の影響が最も小さいために壁面温度は最低となるが、壁面温度は向いの壁面からの赤外放射の影響を最も受けるために、地表面で見られた大きな差はない。ここで、壁面の平均温度はキャノピー内の気温と比較して大きな温度差がなく、また風速も弱いことから壁面からの顕熱輸送量としては地表面や屋根面からの場合と比較してかなり小さい値であると言える。さらに、建物密度60%までは、密度が上がるに連れて夜間の温度が下がらなくなる。しかしながら、建物密度が80%の場合では、地表面温度の低下の影響が卓越して、気温も大きく下

がっている。以上の結果から、壁面はキャノピー内地表面の夜間の放射冷却を妨げる効果がある様に見えるが、それは主に壁面相互において生じているものであり、地表面については壁面ほど寄与しないと言える。しかしながら、これは高さ7 mの低い建物内の場合の結果であり、建物高さを変えることによって、地表面も含めた温度の変化はこれと異なった振る舞いを見せるかもしれない。

5. おわりに

風、放射の建物の効果を取り入れた数値モデルによって、住宅キャノピー層の熱収支を算定した。建物密度を変化させて計算を行った結果、特にキャニオン内の放射、地表面温度の変動は天空率の影響によって量的に大きく異なり、その結果得られる気温場の特性について示された。さらに、壁面があることのキャノピー層内の熱環境に与える役割についても明らかにした。

謝辞：本研究の野外観測は「琵琶湖プロジェクト97(代表：中北英一)」によって行われたものである。杉田弘夫さんをはじめ、多くの長浜市民の皆さんの協力を受けた。記して感謝します。

参考文献

- 1) 浅枝隆・藤野毅：舗装面の熱収支と蓄熱特について。水文・水資源学会誌，第5巻，4号，pp. 3-7，1992.
- 2) 榊原保志：建物における蓄熱の数値実験，天気，36，pp. 431-438，1989.
- 3) 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，第10巻，4号，pp. 308-318，1997.
- 4) 神田学，高柳百合子，横山仁，森脇亮：銀座オフィスビル街における熱収支特性，水文・水資源学会誌，第10巻，4号，pp. 329-336，1997.
- 5) 高橋日出男，福岡義隆：都市域における風速の鉛直分布とヒートアイランドの立体構造，地理学評論，67A-8，pp. 530-550，1994.
- 6) Mellor, G.L. and Yamada, T. : Developed of a turbulent closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space. Phys., 31, pp.1791-1806, 1982.
- 7) Louis, J. : A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, Boundary Layer Meteor., 17, pp.187-202, 1979.
- 8) Vu Thanh Ca・浅枝隆・柴原千浩・藤野毅・中村考一・村上雅博：ストリートキャニオン内の壁・道路の温度分布，水工学論文集，38，pp. 413-418，1994.

(1997. 9. 30受付)