

積雪が屋外温熱環境に及ぼす影響に関する数値解析

-学内共同研究「雪国住環境の整備・向上に関する開発研究」成果報告-

富永禎秀* 持田 灯** 地濃茂雄***

(平成9年10月31日受理)

Numerical Study on Effects of Cold Surface due to Snow on Outdoor Environment

Yoshihide TOMINAGA Akashi MOCHIDA Shigeo CHINO

The outdoor comfort is affected by a lot of factors, i.e. wind velocity, solar radiation, convective and radiative heat transports, etc. Recently, there have been some attempts to develop the numerical method for predicting the human comfort incorporating the effect of these factors. This paper presents the results of numerical study on effects of cold surface due to snow on radiation and convection fields around buildings.

In this study, radiative and convective heat transports near the model of building blocks are analyzed by CFD (Computational Fluid Dynamics) and radiation computation using meteorological data of Niigata City on February 3. Next, spatial distribution of SET*(Standard Effective Temperature) is calculated in order to assess the pedestrian level comfort using the data given from the CFD prediction.

Keywords : Outdoor Environment, Snow surface, Revised k- ϵ model, SET*

1. はじめに

新潟県をはじめとする日本海地域は、国内でも特異な気候的・風土的条件を有しており、特に積雪・風・寒さは、地域の日常生活や産業活動等を制約する大きな要因である。このことから、積雪等の気候風土に適応した住環境の整備・向上が強く求められている。

このような背景を鑑み、本共同研究は、建築、機械制御、情報処理の各分野間での有機的な取り組みによって雪国住環境の整備・向上を図るための基礎資料を得ることを目的として研究を遂行したものである。本報は、その成果の一部で、積雪が屋外温熱環境に及ぼす影響に関する数値解析の結果をとりまとめたものである。

2. 本研究の目的

近年、地方自治体等において、「克雪」「利雪」「親雪」の視点からまちづくりや家づくり、さらには各種のイベントが盛んに行われ、従来のように冬季は雪や寒さにひたすら耐えるばかりではなく、積極的に雪を楽しみ、雪を利用しようという気運が高まってきている。

その場合、より安全かつ快適な冬季の屋外環境を提供するためには、積雪時に形成される屋外温熱環境(「積雪環境」)を正しく予測・制御する必要がある。積雪時の放射・対流

* 建築学科助手

** 建築学科助教授

*** 建築学科教授

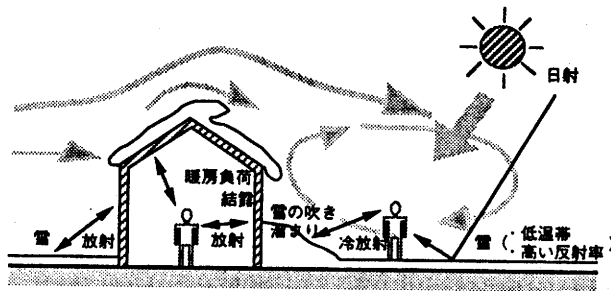


Fig.1 Various factors affecting human comfort in snow environment

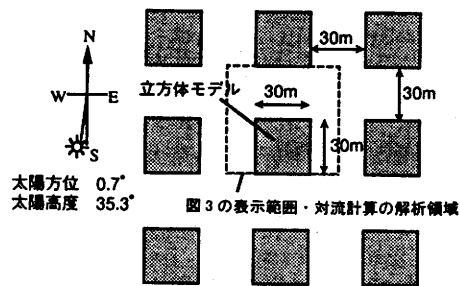


Fig.2 Model building blocks

場を構成する諸要因を図1に示す。積雪により被われた地表面では短波日射反射率（アルベド）が増大し、地表面温度が低下するため、無雪時とは全く異なる放射・対流場が出現する。またこれら積雪時における建築物周りに形成される温熱環境を定量的に把握することは、冷熱源としての雪の利用（利雪）や建物・道路の効率的な除雪（克雪）の観点からも必要である。

本報では、新潟市におけるモデル化された市街地を対象とし、積雪時の屋外空間の放射・対流計算を行い、積雪の有無が屋外温熱環境に及ぼす影響について考察するとともに、その結果から、温熱環境指標（Standard Effective Temperature: SET*）を算出し、積雪が温熱感に与える影響についても検討することとした。

3. 計算概要

3.1 街区モデル

同一形状の立方体建物モデル（1辺 30m）で構成される均等街区を想定。図2に示す計9棟の建物周辺の領域を解析。メッシュ数は合計 1,314。最小メッシュ幅は 2m。対流計算では、□部分を解析対象としてその流入、流出面を周期境界で接続。

3.2 気象条件

新潟市の2月3日正午を対象とする。この時の太陽高度は 35.3°。新潟の標準気象データ^{文1)}より、法線面直達日射量は 447Wm⁻² (385 kcalm⁻²h⁻¹)、水平面天空日射量は 167 Wm⁻² (144 kcal m⁻²h⁻¹)。放射計算で用いる外気温、相対湿度も標準気象データよりそれぞれ 2.6℃、72%と仮定した。対流計算においては、地上 15.9mにおける風速を 6.8m/s、風向は北風と仮定した。

3.3 計算ケース

地表面が積雪に覆われていない裸地の場合を CASE1、地表面がすべて積雪で覆われている場合を CASE2 として比較した。建物等の条件はすべて同じとした。

3.4 計算概要

まず放射計算により地表面、建物壁面の表面温度、対流熱伝達量を求めた。詳細については文献 2, 3 及び注 1～3 を参照されたい。本計算では、積雪表面の日射反射率を 0.7 (日射吸収率 $\alpha_s = 0.3$)^{文4)}としたほか、地表面の熱収支式に融雪による潜熱の項を加えた。次にこれより得られた地表面・建物壁面の対流熱伝達量を境界条件として、各点の風速、温度を求めた。

乱流モデルとしては、乱流熱フラックスの評価に浮力の効果を組み込んだ改良型の k-ε モデルを使用^{文6), 註4)}。対流計算の概要を注 5 に示す。SET*は Gagge ら^{文8)}の人体熱平衡モデ

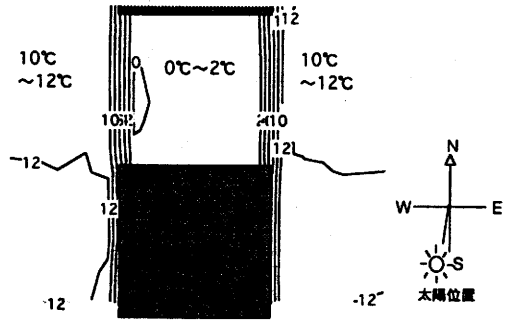


Fig.3 Distribution of surface temperature (CASE1)

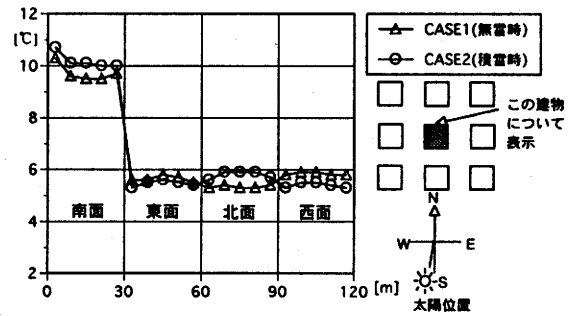


Fig.5 Temperature at wall (7.5m height)

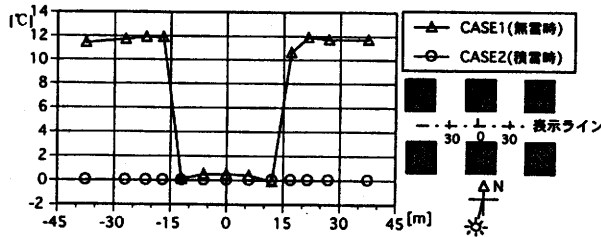


Fig.4 Comparison of surface temperature

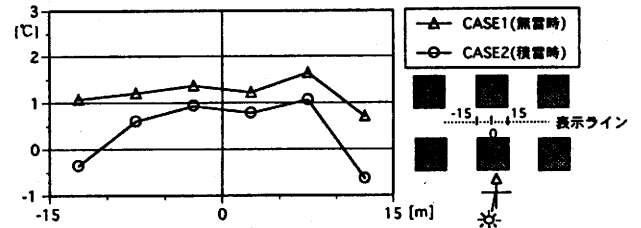


Fig.6 Distribution of MRT

ルに基づくプログラムに従って算出した^{注6)}。

4. 計算結果・考察

4.1 地表面温度分布

CASE1 (無雪時) の地表面温度分布を図3に示す(表示範囲については図2参照)。CASE1 (無雪時) の結果では、日照部で約10~12°C、日影部で約0~2°Cと極めて顕著な温度差が見られる。CASE2 (積雪時) の場合、地表面温度はすべて0°Cとなった(図省略)。

街路中心軸上(東西方向)で地表面温度を比較した結果を図4に示す。日影部における両ケースの差は1°C以下であるが、日照部では10°C以上の非常に大きな差が生じている。

4.2 壁面温度分布

地上高さ7.5mにおける壁面の温度分布を図5に示す。本研究では、計9棟の建物を対象に解析を行っているが、図5に示す結果は図2に表示した中央の建物の壁面温度である。地表における積雪の有無は、壁面温度にも影響を及ぼしている。すなわち、東西面では、ややCASE1 (無雪時) の方が大きくなり、南北面では、CASE2 (積雪時) の方が最大で約1°C程大きくなる結果となった。

4.3 平均放射温度(MRT)の分布

平均放射温度(MRT)の分布(地上2m)を図6に示す^{注7)}。CASE1 (無雪時) の1~3°Cに対して、CASE2 (積雪時) では-1~1°Cと2°C程度低い値を示している。

4.4 平均風速分布

主流方向(南北断面)及び主流直交方向(東西断面)の鉛直断面の風速ベクトルを図7に示す。無雪時(CASE1)と積雪時(CASE2)では、流れの様相に大きな違いは見られなかったため、ここではCASE2 (積雪時) のみ示す。図7(1)では、循環流域内に建物風上面から低温の道路面に向かって比較的強い下降流が見られる。既報^{文2)}で示した夏季の東京を対象とした解析結果の同一断面においては、循環流域内のほぼ全域で上向きの流れが観察され、熱的因子が流れ場にも強い影響を与えることがわかる。

図7(2)は、主流直交方向の風速分布である。建物中央付近の高さから下降した気流は、

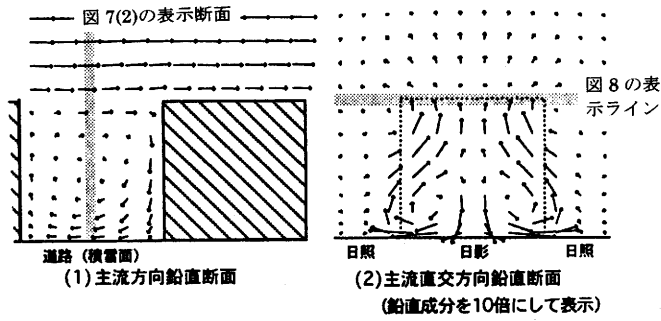


Fig.7 Velocity vectors (CASE2)

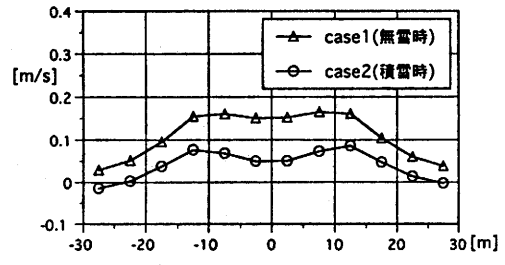


Fig.8 Vertical component of velocity (at building height)

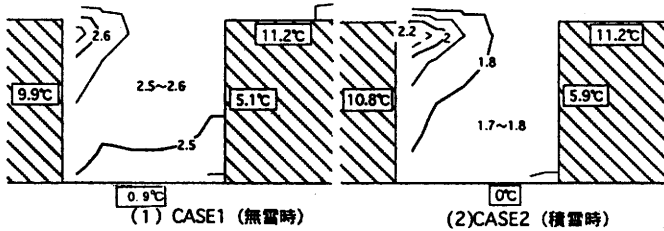


Fig.9 Distribution of air temperature (at streamwise section)

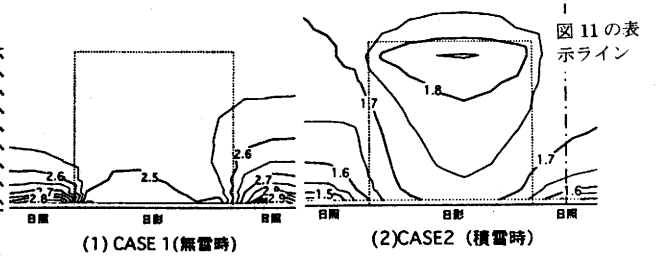


Fig.10 Distribution of air temperature (at lateral section)

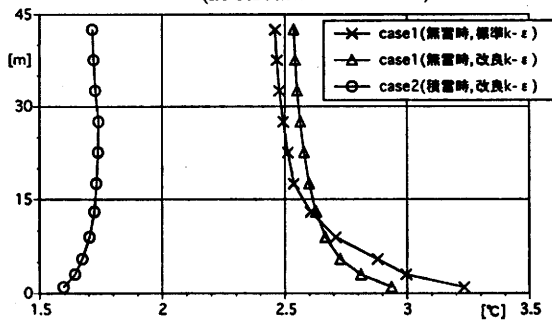


Fig.11 Vertical distribution of air temperature at sunny place

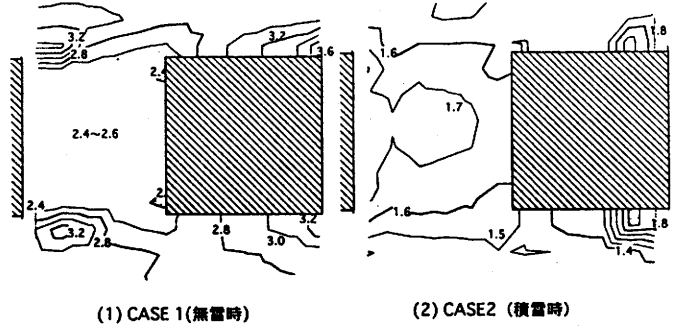


Fig.12 Distribution of air temperature (1m height)

地表面に衝突した後、再上昇し、建物高さより上方に拡散する。建物高さにおける風速鉛直成分を図8に示す。CASE1(無雪時, Δ)の上昇流が、CASE2(積雪時, \circ)に比べて大きい。これは、CASE1(無雪時)では地表面日照部の温度が約 11°C であり(図3参照)、CASE2(積雪時、全地表面温度は 0°C)に比較してかなり高いために、地表付近の高温空気の浮力の影響により上昇流が大きくなったものと考えられる。

4.5 平均温度分布

図7(1)と同じ断面の気温の鉛直分布を図9に示す。気温の分布性状はCASE1(無雪時)とCASE2(積雪時)で大きく変わらず、ともに建物背面付近にやや周囲より高温の領域が現れる。これは、建物壁面で加熱された空気が滞留していることによるものである。しかし、循環流内の気温は、CASE1(無雪時)の約 2.5°C と比較して、CASE2(積雪時)では、約 1.8°C とやや低い。

図7(2)と同じ主流直交方向の鉛直断面の気温分布を図10に示す。CASE1(無雪時)(図10(1))では、地表面日照部(表面温度約 11°C)上部に大きな温度差が観察されるが、それ以外の領域の気温は比較的均一である。これはCASE1では図8に見られるような強い上昇流によって、地表面日照部の高温度が上方へと移流され、拡散した結果であると考えられる。一方、CASE2(積雪時、図10(2))では、上昇流がCASE1に比べて弱いため、循環流域内のやや高温の部分がCASE1より広く存在する。

地表面日照部における気温の鉛直分布を図11に示す(表示位置は図10(2)参照)。CASE1(無雪時)の地表付近では、 $\partial\langle\theta\rangle/\partial x_3 > 0$ の不安定成層となっている。一方、CASE2(積雪時)では、 $\partial\langle\theta\rangle/\partial x_3 < 0$ の安定成層である。安定・不安定成層を伴う流れ場においては、標準k-εモデルの適用に限界があることが従来より指摘されている^{5,6)}。図11には、CASE1(無雪時)の条件を標準k-εモデルにより解いた結果も示している。標準k-εモデルの結果は、改良k-εモデルの結果に比べて、地表面近傍の温度が高いが、より上部の気温は逆に低い。これは標準k-εモデルでは浮力による乱流熱フラックス $\langle u_3'\theta' \rangle$ の生産が考慮されていないため、地表付近の乱流熱輸送が過小評価されているためであり、既報^{5,6)}の結果から判断して改良k-εモデルが妥当な結果を与えていると考えられる。

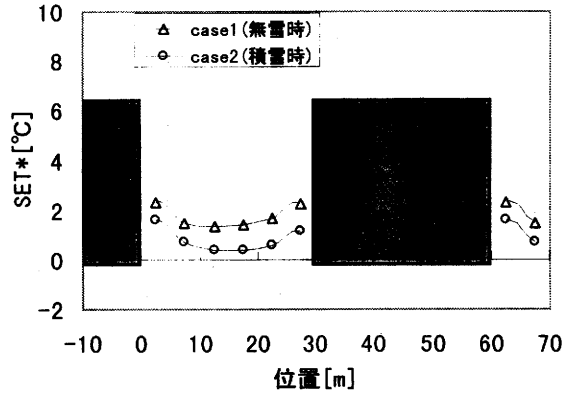


Fig.13 Distribution of SET*

地上1mの気温の水平分布を図12に示す。CASE1(無雪時, 図12(1))では、循環流域の2.4°C~2.6°Cに対して、それ以外の部分(日照部)の温度は2.6~3.6°Cで、循環流域よりも高い。これは、循環流域(日影面)の地表面温度(約1°C程度)と道路日照面の地表面温度(約11°C)の差が大きいことと対応している。一方、CASE2(積雪時, 図12(2))では、循環流域内及び建物側面で1.6~1.8°Cと、やや周辺より気温が高いが、全体的な温度差は小さい。CASE1(無雪時)と比較してCASE2(積雪時)の方が全領域で気温は低く、積雪の有無による温度差は最大で1.5°C程度である。

地上1mの気温の水平分布を図12に示す。CASE1(無雪時, 図12(1))では、循環流域の2.4°C~2.6°Cに対して、それ以外の部分(日照部)の温度は2.6~3.6°Cで、循環流域よりも高い。これは、循環流域(日影面)の地表面温度(約1°C程度)と道路日照面の地表面温度(約11°C)の差が大きいことと対応している。一方、CASE2(積雪時, 図12(2))では、循環流域内及び建物側面で1.6~1.8°Cと、やや周辺より気温が高いが、全体的な温度差は小さい。CASE1(無雪時)と比較してCASE2(積雪時)の方が全領域で気温は低く、積雪の有無による温度差は最大で1.5°C程度である。

4.6 SET*の分布

地上1mにおけるSET*の主流方向(南北断面)の分布を図13に示す。ここで示しているのは日影面におけるSET*の比較である。CASE1(無雪時)では2°C前後であるのに対して、CASE2(積雪時)は1°C前後であり、日影面では、積雪時の方が1°C程度低い結果となった。

5. 結論

- ①冬季の市街地の放射・熱移動解析を行い、積雪が屋外放射環境に及ぼす影響を調べた結果、積雪の有無は、地表面温度, MRTの分布ばかりでなく、周辺建物の壁体温度にも影響を与えることが明らかになった。
- ②上記の放射計算の結果を境界条件として、乱流熱フラックスの評価へ浮力効果を導入した改良型k-εモデルによる対流計算を行った。標準k-εモデルによる結果は、改良k-εモデルに比べて高温地表面付近の乱流熱輸送を過小評価しており、今回対象とした様な流れ場への標準k-εモデルの適用には限界があり、筆者らの提案した改良k-εモデル¹⁰⁾が有効である。
- ③さらに、数値解析より得られた放射・対流場から温熱環境指標(SET*)の空間分布を算出し、積雪の有無が冬季の屋外温熱環境に無視し得ぬ影響を及ぼすことを明らかにした。

謝辞 本研究の遂行に際して、平成8年度学内共同研究費の助成を得たこと、並びに本共同研究のメンバーである機械制御システム工学科中嶋新一教授、情報電子工学科 金井靖助教授、同 田村裕助教授より有益な御助言を頂きましたことに対し、記して謝意を表します。

注1) 日射・放射計算により求められた各メッシュにおける日射取得エネルギーをそのメッシュにおける表面発熱 Q_{SOLAR} として扱い、以下の熱収支モデルを解くことにより地表面・壁面温度 T_i を求めた²⁾。

$$Q_{SOLAR} + Q_{RD} + Q_{CV} + Q_{CD} + Q_{EV} - Q_{SM} = 0 \quad (1)$$

ここで Q_{SOLAR} は短波長放射伝熱、 Q_{RD} は長波長放射伝熱、 Q_{CV} は対流伝熱、 Q_{CD} は地表面・建物への熱伝導²⁾、 Q_{EV} は蒸発散による放熱、 Q_{SM} は融雪による潜熱 (CASE2 の場合) を表す。

なお Q_{SOLAR} の算出に際し、CASE1 (無雪時) においては、裸地を想定し地表面の日射反射率を 0.2 ($\alpha_s = 0.8$)、CASE2 (積雪時) では積雪表面の日射反射率を 0.7 ($\alpha_s = 0.3$)⁸⁾ とした。建物壁面は両ケースともに反射率を 0.2 ($\alpha_w = 0.8$) とした。また Q_{EV} の算出において、CASE1 (無雪時) では緑地率 10% を仮定して $W_i = 0.01$ 、CASE2 (積雪時) では地表面では水蒸気は飽和状態と考え、 $W_i = 1.0$ を与えた⁴⁾。

(1) 式の左辺第 6 項の Q_{SM} (融雪による潜熱) は次のように表せる。

$$Q_{SM} = A_i \ell_s M_s \quad (2)$$

A_i : メッシュ i の面積 [m^2]、 ℓ_s : 氷の融解潜熱 [$334 kJ kg^{-1}$ ($80 kcal kg^{-1}$)]

M_s : 融雪量 [$kg m^{-2} s^{-1}$]

本研究では、融雪が連続的に生じていると仮定し、文献 4 の記述を参考に、 $\ell_s M_s = 55 W m^{-2}$ として一定値として与えた。この条件で熱収支式を反復計算により解き、その過程で積雪面温度 T_i が $0^\circ C$ 以上となった場合、 $T_i = 0$ と置き換え³⁾、 $T_i < 0^\circ C$ であれば融雪は起きないので $Q_{SM} = 0$ として反復計算を続行して最終的に表面温度を求めた。今回は適用の容易さからこのような簡便な方法を用いたが、一般に気温が $0^\circ C$ 以上で融雪が連続的に生じているときの積雪層は全層 $0^\circ C$ で一定とみなしてよいとされるため、問題は少ないと考えている。積雪面をいくつかの層に分割した、より精度の高いモデル⁵⁾ の採用を今後検討したい。

注2) 建物壁体の Q_{CD} は、壁体の熱コンダクタンス $5.8 W m^{-2} K^{-1}$ ($5 kcal m^{-2} h^{-1} K^{-1}$)、室温 $22^\circ C$ 、室内側壁面の総合熱伝達率 $9.3 W m^{-2} K^{-1}$ ($8 kcal m^{-2} h^{-1} K^{-1}$) と仮定し計算した。なお積雪面では、積雪面の受ける正味のエネルギーはすべて融雪に使われるため、地中への熱伝導はないものとした。

注3) 積雪面では、 $T_i \leq 0$ となるべきであるが、反復計算の途中段階で、部分的に $T_i > 0$ となることがあった。これは、今回の計算で融雪による潜熱 Q_{SM} ((2) 式) を一定値 ($55 W m^{-2}$) として扱ったことによるものである。この点については今後、改良が必要と考えている。

注4) 本モデルは、乱流熱フラックス $\langle u_i' \theta' \rangle$ のモデルとして、 $\langle u_i' \theta' \rangle$ の輸送方程式の生産項に着目して導かれた WET モデルから出発している⁷⁾。WET モデル中の平均速度勾配による生産項を無視し、また水平方向の温度勾配が鉛直方向のそれに比べて十分小さいと仮定し、さらに $\langle u_3'^2 \rangle = (2/3) k$ と近似することにより、鉛直方向の乱流熱フラックスを次式でモデル化する。

$$-\langle u_i' \theta' \rangle = \frac{\nu}{\sigma_\theta} \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_i} + \frac{k}{\varepsilon} C_{\theta\theta} \langle \theta'^2 \rangle g \beta \quad \sigma_\theta = 0.5, C_{\theta\theta} = 0.25 \quad (3)$$

(3) 式中の $\langle \theta'^2 \rangle$ については、本計算ではその輸送方程式を解いて求めた。

注5) 流入側と流出側の境界の間の圧力損失に対応する圧力差 Δp を与えた。 $\Delta p = 2.0 \times 10^{-3} \rho U_0^2$ 、ここで $U_0 = 7.4 m/s$ 。鉛直方向には $5H_b$ の解析領域を設けた。側面は対称壁 ($\langle u_2 \rangle = 0$)、他の諸量の法線方向の勾配は 0)、上空面は $\langle u_3 \rangle = 0$ 、他の諸量の勾配は 0。但し、温度については、温度自体ではなく乱流熱フラックス $\langle u_3' \theta' \rangle$ の勾配を 0 とした。地表面、建物壁面では、 τ_w は generalized log law で与え、対流熱伝達量は、市街地熱移動計算の結果を補間して与えた。差分スキームは時間に関しては後退差分、空間に関しては QUICK スキーム。メッシュ分割は $14(x_1) \times 14(x_1) \times 29(x_1)$ 。

注6) 発汗による体温調節機構を組み込んだ Two-node モデルを使用。着衣量は 1.0 clo (セーターと長ズボン)、代謝量は 1.5 Met (ゆっくりとした歩行と立位静止の中間) とした。

注7) MRT は次式により求めた。

$$T_r = T_{ro} + \alpha_M q / (16 \sigma T_{ro}^3) \quad (4)$$

積雪時は、積雪面で短波放射の多くが反射され、それが人体に吸収されるため、その分を MRT として考慮する必要があると考えられるが、(4) 式では、その影響は考慮されていない。この地表面での反射分を考慮した MRT の算出モデルは今後の課題としたい。図 6, 13 では、短波放射の影響の小さい日影面のみを示す。

参考文献 1) 空調学会：標準気象データ 2) 持田, 村上, 大森, 富永：建築学会大会梗概集, 1994. 10 3) 大森, 村上, 加藤：空調学会講演論文集, 1994. 10 4) 近藤純正編著：水環境の気象学, 朝倉書店, 1994. 4 5) J. Kondo and T. Yamazaki: J. Applied. Meteor., vol. 29, 1990. 5 6) 野口, 村上, 持田, 富永：建築学会大会梗概集, 1994. 9 7) Launder, B. E.: J. of Heat Transfer, vol. 110, 1988 8) A. P. Gagge et al.: ASHRAE Transactions, 92(1), 709-731