

# 対流・放射・湿気連成シミュレーションによる 市街地空間の温熱環境の数値解析 —その2 改良 $k-\epsilon$ モデルを用いた屋外温熱環境の緑地効果の検討—

大岡 龍三\* 村上 周三\*\* 持田 灯\*\*\* 吉田 伸治\*\*

## Numerical Analysis of Outdoor Thermal Environment in City Block Area Using Coupled Simulation of Convection and Radiation — Part 2 CFD Study on of Outdoor Thermal Environment Using Modified $k-\epsilon$ model —

Ryozo OOKA, Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Shinji YOSHIDA

(Received Aug. 31, 1998)

In this study, velocity, temperature and humidity fields in urban area were analyzed using CFD technique developed by the authors. Spatial distribution of SET\* is calculated in order to assess pedestrian comfort from the CFD predictions. It was clarified that 1) revised  $k-\epsilon$  model can predict the velocity field and temperature field more accurately than does the standard  $k-\epsilon$  model, 2) greening is effective for relaxation of thermal environment on the urban area in summer, 3) coupled simulation of radiation and convection with incorporating of moisture transport is very powerful tool for evaluating the outdoor environment.

**Key Words** : Numerical Simulation, Outdoor Thermal Environment, SET\*, Effect of Greening

1.序 前報(その1)<sup>\*)</sup>で示した放射伝熱解析を組み込んだ対流・放射・湿気連成解析プログラムにより、市街地の速度場、温度場、放射場、湿度場を解析した。本報(その2)では対流計算に用いた改良  $k-\epsilon$  モデルの概要を示すと共に、解析結果から SET\* の空間分布を算出し、緑化が夏季の都市環境に及ぼす影響について検討した結果を示す。

2.改良  $k-\epsilon$  モデルの概要 本研究では通例の標準  $k-\epsilon$  モデルに対して、①乱流熱フラックスの評価への浮力の効果の組み込み<sup>\*)</sup>、②建物風上側での乱流エネルギー  $k$  の過大生産を抑制する改良型 Launder-Kato モデルの組み込み<sup>\*)</sup>の2つの改良を行った。

### 2.1 乱流熱フラックスの評価への浮力効果の組み込み(表1)

標準  $k-\epsilon$  モデルを始めとする渦粘性近似(EVM)はその簡便さ故、広く利用されているが、等方的な渦粘性に基づく概念であるため、都市を始めとする不安定境界層のような非等方性の強い浮力の卓越する流れ場では、一般

に精度の高い解を与えることはできない。そこで、本研究では文献 2 で筆者らの提案した改良型 k-ε モデルを組み込む。その導出過程を表 1 に示す。

2.2 建物風上側での乱流渦度 k の過大生産の抑制

標準 k-ε モデルでは乱流渦度 k の生産項  $P_k$  を表 2(6)式でモデル化している。周知のように、このモデル化は建物風上側コーナ付近のように主流が壁面等に衝突する領域では、k が過大に生産されてしまう欠点がある<sup>2)</sup>。この欠点を是正するため、Launder、Kato は k の生産項  $P_k$  を表 2(9)式のように修正した Launder-Kato モデル<sup>3)</sup>(以下 L-K モデル)を提案した。L-K モデルは、過度  $\Omega$  が淀み点付近で小さくなる性質を利用し、k の輸送方程式中の生産項  $P_k = \nu_t S^2$  (表 2(6)式) を  $P_k = \nu_t S \Omega$  (表 2(9)式) と変更することで建物風上壁面での k の過大生産を抑制するモデルである (S、 $\Omega$  の定義:表 2(8),(10)式)。しかし、L-K モデルをそのまま用いると  $\Omega/S > 1$  の領域において標準 k-ε モデルに比べ、 $P_k$  を過大評価することになる。しかも、 $\Omega/S > 1$  の値を示す領域は流れ場によっては無視し得ぬ大きさを占める<sup>2,4)</sup>。そこで筆者らは、この問題を解決するために、L-K モデルの適用範囲を表 2(11),(12)式に示す様に、 $\Omega/S \leq 1$  の領域に限定している改良型 L-K モデルを提案した<sup>2,4)</sup>。本研究ではこの改良 L-K モデルも併せて組み込んだ。

3 対流・放射・湿気連成解析の概要 前報(その 1)<sup>2,1)</sup>

で示した放射伝熱解析を組み込んだ、対流・放射・湿気連成解析プログラムを用いて、市街地の速度場、温度場、放射場、湿度場を解析した。

3.1 街区モデル(図 1) 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。

3.2 気象条件(図 1) 東京の 7 月 23 日午後 3 時の気象条件を対象とする。この時の太陽位置を図 1 中に示す(太陽高度は 45.2°)。風向南風<sup>2,1)</sup>。

3.3 計算ケース(表 3) case1 は筆者らが文献 7 で示したのと同様の考えに基づく計算であり、地表面の緑地率を 10%と想定し、Viollet 型の標準 k-ε モデルを使用。case2 は case1 と同じ土地利用条件で 1)改良 k-ε モデル<sup>2,3,4)</sup>の導入、2)絶対湿度(総水分混合比)の輸送方程式<sup>2,3,4)</sup>の導入<sup>2,3)</sup>を行った case である。一方 case3 では全ての地表面が緑地に覆われた場合を想定し、case2 と同じ手法で解析している。

表 1 浮力効果を含んだ k-ε モデルの導出

文献 2 で示す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(1)式から出発し、簡略化したものを用いている<sup>2,5)</sup>。

$$\langle u_i \theta \rangle = -\frac{k}{\epsilon} \left[ C_{\theta 1} \langle u_i u_j \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j} + C_{\theta 2} \langle u_i u_j \rangle \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} + C_{\theta 3} g_i \beta \langle \theta'^2 \rangle \right] \quad (1)$$

これが WET モデルの概念に基づく高精度近似モデルの原形である。ここでは  $C_{\theta 1} = C_{\theta 2} = C_{\theta 3} = 0.25$  である。

既報<sup>2,3)</sup>より、境界層(主流方向  $x_1$ 、鉛直方向  $x_3$ )において、(1)式右辺第 2 項は無視できる。かつ  $\langle u_i \theta \rangle$  の鉛直方向成分のみに限定し、(1)式を変形すると

$$\langle u_i \theta \rangle = -\frac{k}{\epsilon} \left[ C_{\theta 1} \left( \langle u_i u_j \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j} + \langle u_i u_j \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j} \right) + C_{\theta 3} g_i \beta \langle \theta'^2 \rangle \right] \quad (2)$$

ここで  $|\partial \langle \theta \rangle / \partial x_3| \ll |\partial \langle \theta \rangle / \partial x_1|$  より右辺第 1 項は無視できる。

$$\langle u_i \theta \rangle = -\frac{k}{\epsilon} \langle u_i u_j \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j} - \frac{k}{\epsilon} C_{\theta 3} g_i \beta \langle \theta'^2 \rangle \quad (3)$$

(3)式の  $\langle u_i u_j \rangle$  を (2/3)k で近似し、浮力効果を含んだ  $\langle u_i \theta \rangle$  の渦粘性近似表現を得る。

$$\begin{aligned} \langle u_i \theta \rangle &= -\frac{2}{3} \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_3} - \frac{k}{\epsilon} C_{\theta 3} g_i \beta \langle \theta'^2 \rangle \\ &= -\frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_3} - \frac{k}{\epsilon} C_{\theta 3} g_i \beta \langle \theta'^2 \rangle \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式右辺第 2 項が今回新たに導入する浮力効果を考慮した付加項である。(4)式中の  $\sigma_\theta$  と  $C_{\theta 1}$ 、 $C_\mu$  の関係は  $\nu_t = C_\mu (k^2/\epsilon)$  であるから

$$\frac{2}{3} C_{\theta 1} = \frac{C_\mu}{\sigma_\theta} \quad (5)$$

ここで  $C_{\theta 1} = 0.25$ 、 $C_\mu = 0.09$ 、より  $\sigma_\theta = 0.5$ 。右辺第 2 項中の  $\langle \theta'^2 \rangle$  は輸送方程式より算出する。

表 2 改良 L-K モデルの基礎方程式

1.標準 k-ε :

$$P_k = \nu_t S^2 \quad (6) \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7) \quad S = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} \right)^2} \quad (8)$$

2.LK モデル :

$$P_k = \nu_t S \Omega \quad (9) \quad (\nu_t, \text{eq.}(7)) \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} \right)^2} \quad (10)$$

3.改良 LK :  $P_k = \nu_t S^2$  ( $\Omega/S > 1$  の場合) (11)

$P_k = \nu_t S \Omega$  ( $\Omega/S \leq 1$  の場合) (12)

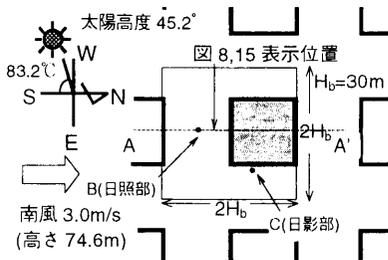


図 1 解析領域

3.4 計算概要<sup>2)</sup>

1)放射及び対流計算 まず、前報(その1)<sup>1)</sup>で示した放射計算による市街地熱移動解析を行い、地表面、建物壁面の表面温度、対流熱伝達量、湿気伝達量を求めた<sup>3)</sup>。次に、これより得られた地表面・建物壁面の対流熱伝達量、湿気伝達量を境界条件として対流計算を行い、各点の風速、温度、絶対湿度を求めた。

2)MRTの算出 中村ら<sup>4)</sup>に倣い、人体を微小立方体とみなしてMRTを算出した<sup>4)</sup>。詳細は前報(その1)<sup>1)</sup>注8参照。

3)SET\*の算出 Gaggeら<sup>5)</sup>の人体熱平衡モデルに基づくプログラムに従って算出した<sup>5)</sup>。

## 4.計算結果 4.1 改良k-εモデルの導入効果の検討

1)乱流エネルギーkの鉛直断面内の分布(図2) case2(改良k-ε)では、case1(標準k-ε)に比べ、循環流域内外において全般にkの値が小さい。これはcase2においてkの過大生産を抑える改良L-Kモデルを組み込んだため、case1に比べてkの値が小さくなったものと考えられる。

2)乱流拡散係数 $v_t$ の鉛直断面内の分布(図3) case2(改良k-ε)では、case1(標準k-ε)に比べ、循環流域内外において $v_t$ の値が小さい。これはcase2では、kの値がcase1に比べ、全般に小さくなったためと考えられる(図2)。

3)風速分布(図4.5) 図4に鉛直断面内の風速ベクトルを、図5に図4中に示す循環流域内中央での風速の鉛直成分 $\langle u_z \rangle$ の鉛直分布を示す。case1に比べ、case2では循環流域内外において $\langle u_z \rangle$ がかなり大きい。これは先ず、case2ではcase1に比べ、循環流域内外において、 $v_t$ の値が低下したため(図3)、屋上面付近と、循環流域内の間の、運動量の拡散が減少する。このため、case2ではcase1に比べて、建物屋上面付近で全般に風速が大きくなる。これに伴い、循環流域内へ流入する風速も大きくなり、循環流域内の風速の鉛直成分 $\langle u_z \rangle$ も大きくなったものと考えられる。

4)鉛直断面内の気温分布(図6) case2ではcase1に比べ、循環流域内で約0.5℃程度気温が低い。case1とcase2の結果の一連の差は、case2において今回新たに組み込んだ2つのk-εモデルの改良(①乱流熱フラックスへの浮力効果の組み込み、②建物風上側での乱流エネルギーの過大生産の抑制)のうち、後者の効果をもつ改良L-Kモデルを用いたため生じたものと推定され

表3 計算ケース

No.	乱流モデル	地表面の土地利用	地表面の蒸発効率	湿度分布
case1 (文7)	標準k-ε	地表面の緑地率が10%であると想定した場合(緑地率10%)	0.03	一定 (相対湿度=58%)
case2	改良k-ε ① $\langle u'\theta' \rangle$ の評価への浮力効果の組み込み <sup>2)</sup> (表1)。 ②建物風上でのkの過大生産の抑制 <sup>2)</sup> (表2)。	地表面が全て緑地であると想定した場合(全面緑地)	0.3	絶対湿度 (総水分混合比)の 輸送方程式を解く

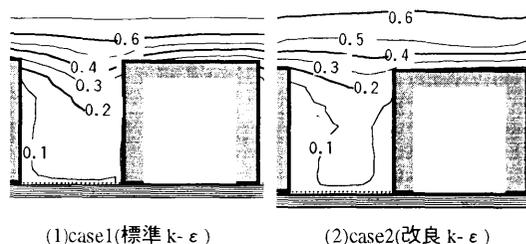


図2 乱流エネルギーkの分布(鉛直断面)

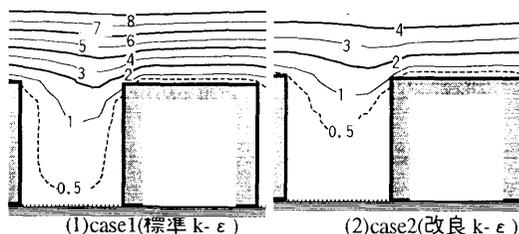
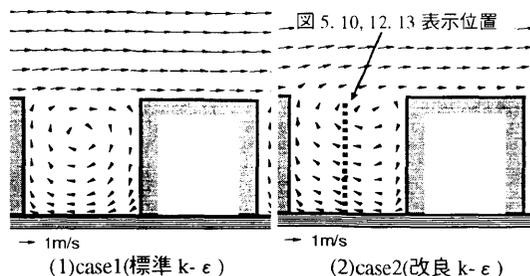
図3 乱流拡散係数 $v_t$ 分布図(鉛直断面)

図4 風速ベクトル図(鉛直断面)

る。即ち、上述したように乱流エネルギー  $k$  の生産が抑制されたため、case2(改良  $k-\epsilon$ )では、case1(標準  $k-\epsilon$ )に比べ、循環流域内の乱流エネルギー  $k$  の値が全般に減少し(図 2)、これに伴い、 $v_t$  も減少し(図 3)、この結果、運動方程式中の拡散項の寄与が小さくなり、風速が増大している(図 4,5)。このため、case2 では、地表面付近の高温な空気が循環流域内に滞留せず、より上方へ移流されるため、循環流域内の温度は case1 に比べ低めとなった(図 6)。以下では、この改良型  $k-\epsilon$  モデルを利用して、緑地率 10% の場合(case2)と緑地率 100% の場合(case3)を比較する。

4.2 緑地率の変化の影響(case2 と case3 の比較)

1) 地表面熱収支及び温度(図 7.8) 図 7 に解析領域内の日照部及び日影部の代表点(図 1 中 B 点と C 点)

における地表面の顕熱・潜熱フラックスの比較を示す。ここで正値は地表への流入を負値は地表からの流出を示す。日照部・日影部共に、case2(緑地率 10%)と比べて case3(全面緑地)では、負値を示す潜熱フラックスの絶対値が大きい。特に日照部での差が非常に大きい(図 7(1))。これは、case3 の方が地表面の蒸発効率を大幅に大きく設定したためである。その影響から case3 の地表面温度(図 8(2))は、case2(図 8(1))より日照部で約 14℃、日影部で約 6℃低下している<sup>注 9)</sup>。そして、この地表面温度の低下により、case3 の顕熱フラックスの絶対値は日照部で case2 に比べて約 150W/m<sup>2</sup>程度減少している(図 7(1))。

2) MRT 分布(図 9) 図 9 に循環流域内高さ 3m の MRT の主流方向の分布を示す。case3(全面緑地)では、case2(緑

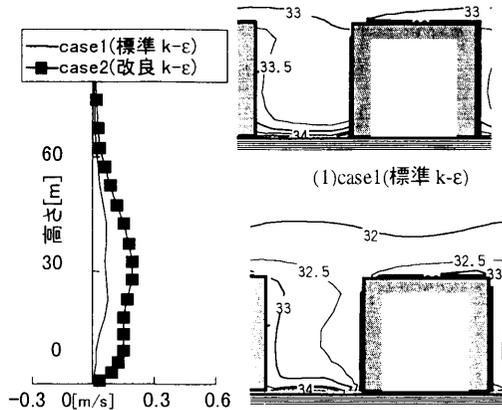
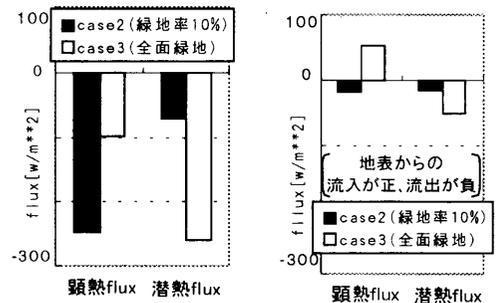


図 5 <u>の鉛直分布 (1)case1(標準  $k-\epsilon$ ) (2)case2(改良  $k-\epsilon$ )  
図 6 気温分布(鉛直断面)



(1)日照部(図 1 中 B 点) (2)日影部(図 1 中 C 点)  
図 7 地表面の顕熱及び潜熱フラックス

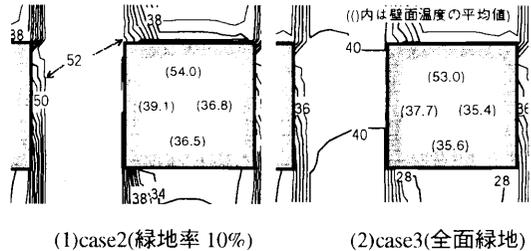


図 8 地表面温度分布

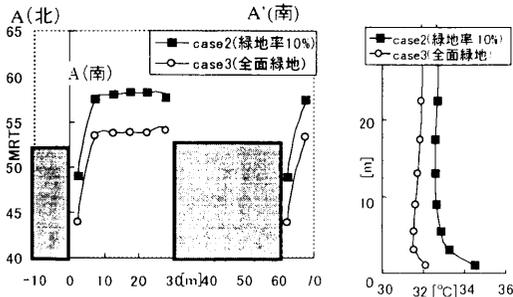
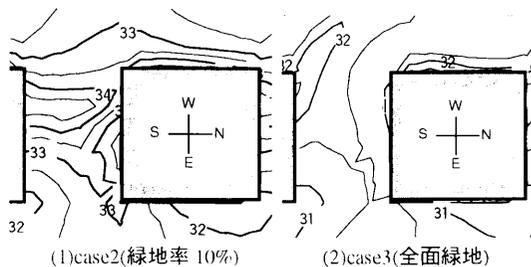


図 9 高さ 3m の MRT 分布 図 10 気温の鉛直分布



(1)case2(緑地率 10%) (2)case3(全面緑地)  
図 11 気温の水平分布(高さ 3m)

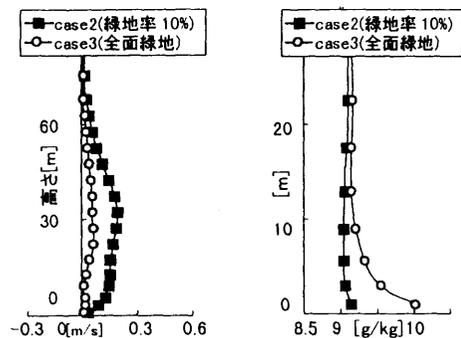


図 12  $\langle u_z \rangle$  の鉛直分布 図 13 絶対湿度の鉛直分布

地率 10%)に対して、全般に約 5°C程度 MRT が低い。又、両 case 共に、建物北側壁面近傍で MRT が急激に下がる。これは日影のため、建物北側壁面の温度が低いためである(図 8)。

3)気温分布(図 10,11) 図 10 に循環流域内の気温の鉛直分布を示す。case3(全面緑地)では、case2(緑地率 10%)に対し

て、地表付近で約 2.5°C、循環流域上方においても約 1.2°C程度気温が低下する。図 11 に高さ 3m の気温の水平分布を示す。case3(全面緑地)では case2(緑地率 10%)より循環流域内で 2.5~3°C程度気温が低い。

4)風速の鉛直成分 $\langle u_z \rangle$ の分布(図 12) case3の方が case2 より、全般に風速の鉛直成分の絶対値が約 0.1m/s 程度小さい。これは case3 における気温の全般的な低下(図 11(2))により、 $\langle u_z \rangle$ の輸送方程式中の浮力項 $-g, \beta(\theta)$ が小さくなったためであると推定される。

5)絶対湿度分布(図 13) 図 13 に図 10、12 と同じ表示位置での絶対湿度の鉛直分布を示す。case3(全面緑地)の方が、case2(緑地率 10%)より、地表付近で約 0.9[g/kg]程度、絶対湿度が高く、顕著な差が生じている<sup>17)</sup>。

6) SET\*分布(図 14,15) 図 14 に高さ 3m の SET\*の水平分布を示す。case2、case3 共に日照部と日影部で非常に顕著な差が見られ、屋外空間の温熱環境に日射が極めて大きな影響を与えることがわかる。図 15 に循環流域内高さ 3m の SET\*の主流方向の分布を示す。case3(全面緑地)では case2(緑地率 10%)に対して循環流域内で約 2.8~5.2°C程度 SET\*が低くなるという結果となった<sup>18)</sup>。

5.結論 (1)  $\langle u_z, \theta \rangle$ の評価への浮力効果及び建物風上側の乱流 $\text{Re}^* - k$ の過大生産の抑制効果を導入した改良型  $k - \epsilon$  モデルにより夏季の市街地の速度場、温度場、湿度場を解析し、これに基づき SET\*の空間分布を算出した。

(2) 改良  $k - \epsilon$  モデルの結果では、標準  $k - \epsilon$  モデルの結果と比べ平均風速分布、温度分布の結果等に差異が見られた。

(3) 改良  $k - \epsilon$  モデルを用いて、緑地率の変化が市街地の SET\*の空間分布に及ぼす影響を試算した結果、case2(緑地率 10%)に対して、case3(全面緑地)では循環流域内中央において SET\*が約 2.8~5.2°C低下した結果が得られた。

注 1) 法線面直達日射量は 765W/m<sup>2</sup>、水平面天空日射量は 136W/m<sup>2</sup>、外気温、相対湿度はそれぞれ 31.6°C、58%(東京の 1989~1992 年の 7/23 午後 3 時の平均)。気象庁高さ(74.6m)の風速は 3m/s(東京 7 月の 1975~1990 年の平均)。

注 2) 絶対湿度(総水分混合比)  $q$  の輸送方程式は次式の通り<sup>19),20)</sup>。

$$\frac{\partial \langle q \rangle}{\partial t} + \langle u_x \rangle \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_x}{\sigma_w} \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial x} \right) \quad (13)$$

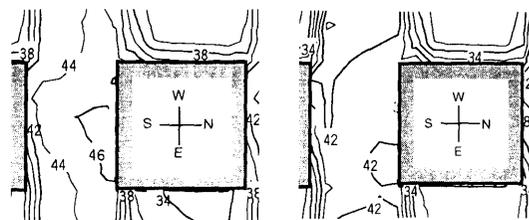


図 14 SET\*の水平分布(高さ 3m)

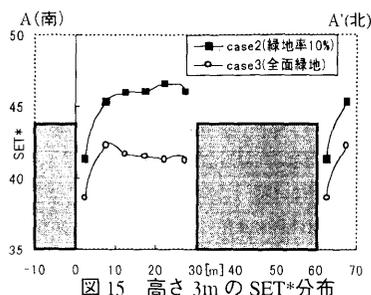


図 15 高さ 3m の SET\*分布

$q$  : 絶対湿度(総水分混合比)[g/kg]、 $\sigma_w = 1.0$

注 3) 建物壁体の熱伝導率は、建物壁体の熱コンタクト $5.8\text{W/m}^2\text{K}$ 、室温  $26^\circ\text{C}$ 、室内側壁面の総合熱伝達率  $9.3\text{W/m}^2\text{K}$  と仮定し計算した。一方、地中の熱伝導率は、地中の熱伝導率  $1.16\text{W/mK}$ 、地中  $0.5\text{m}$  の温度を  $26^\circ\text{C}$  と仮定し計算した。

注 4) 既報<sup>7)</sup>では MRT の算出の際、人体を微小球体とみなし、MRT を算出していた。

注 5) 発汗による体温調節機構を組み込んだ Two-node model を使用。着衣量を  $0.5\text{clo}$ (半袖シャツとズボン)の着衣状態に対応)、人体の代謝量は  $1.5\text{Met}$ (ゆっくりした歩行と立位静止時の中間)とした。

注 6) 尾島ら<sup>13)</sup>の実測によると、8月上旬の晴天日において、地表面温度はアスファルト面(日照部)で約  $48^\circ\text{C}$ 、緑地(日照部)で約  $34^\circ\text{C}$ 、地表面からの顕熱フラックスはアスファルト面で約  $280[\text{W/m}^2]$ 、緑地で約  $35[\text{W/m}^2]$ 、潜熱フラックスは緑地で約  $256[\text{W/m}^2]$  と報告されている。一方、本計算では、地表面温度は case2(緑地率 10%)で約  $52^\circ\text{C}$ 、case3(全面緑地)で約  $38^\circ\text{C}$ 、顕熱フラックスは case2 で約  $250[\text{W/m}^2]$ 、case3 で約  $100[\text{W/m}^2]$ 、潜熱フラックスは case2 で約  $70[\text{W/m}^2]$ 、case3 で約  $260[\text{W/m}^2]$  という値を示す。周囲の環境、気象条件は異なるとはいえ、実測と本計算では傾向的に良い対応が得られた。

注 7) 図は示さぬが、地表付近において相対湿度は case2 で約 52%、case3 で約 62%程度の値を示し、case3 では、case2 に対して、約 10%相対湿度が上昇した。

注 8) case3 の循環流域内における SET\*の低下について、各物理量の変化の影響を検討する。

まず、case2 の SET\*の値を基準として、case2 の各物理量の計算結果のうち、気温のみ case3 の値を用いて、SET\*の計算を行うと、図には示さぬが、case2 の SET\*より  $1.1\sim 2.0^\circ\text{C}$ 低下する結果が得られた。

次に、case3 における MRT の低下が SET\*の変化に与える影響について検討する。上記と同様に、case2 の結果のうち、MRT のみ case3 の値を用いて SET\*を算出すると、 $1.6\sim 2.7^\circ\text{C}$ 低下する。

逆に、case3 における湿度の増加は SET\*の値を最大  $0.2^\circ\text{C}$ 程度上昇させる結果となった。

最後に、case3 における風速の変化により、SET\*は循環流域内において  $0.9^\circ\text{C}$ の上昇から  $1.8^\circ\text{C}$ の低下まで幅の広い変化が観られた。

## 参考文献

- [1]大岡、村上、持田他、福井大学工学部紀要 1998.
- [2]野口、村上、持田他、建築学会大会、1994.9、65-66
- [3]B.E.Launder, M.Kato, ASME Fluid Engineering Conference, 1993.6、20-24
- [4]近藤、村上、持田、第 8 回数値流体力学シンポジウム講演論文集、1994.12.363-366
- [5]B.E.Launder, Journal of Heat Transfer, 1988, vol.110
- [6]持田、村上、林、建築学会計画系論文報告集、第 423 号、1991.5、23-31
- [7]村上、持田、富永他、関東支部、1994、81-84
- [8]Yamada.T. and S.Bunker, Journal of Applied Meteorology, 28, 1989, 545-554
- [9]近藤、水環境の気象学、朝倉書店、1994
- [10]吉田、村上、持田他、空調学会講演論文集、1997.8、1265~1268
- [11]中村、建築学会計画系論文報告集、第 376 号、1987.6、29-35
- [12]A.P.Gagge et al., AHSRAE Transactions, 92(1), 1986, 709-731
- [13]高、三浦、尾島、日本建築学会計画系論文報告集、第 456 号、1994.2.75-8