

# 対流・放射・湿気連成解析による屋外環境共生空間の緑地効果の検討

## Numerical Analysis of Outdoor Symbiotic Environment

吉 田 伸 治\*・大 岡 龍 三\*\*・村 上 周 三\*\*・持 田 灯\*\*\*・富 永 禎 秀\*\*\*

Shinji YOSHIDA, Ryozo OOKA, Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Yoshihide TOMINAGA

本研究では、(1) 浮力効果、(2) 建物風上側の乱流エネルギーの過大生産の抑制効果を導入した改良 k-ε モデルに水蒸気輸送方程式を組み込んだプログラムを用いて市街地の温熱環境を解析した。解析結果から新標準有効温度 SET\* の空間分布を算出し、都市緑化が夏季の屋外環境に及ぼす影響を検討した。解析の結果、都市緑化が夏季の屋外環境の緩和に貢献していることを確認した。

### 1. 序

近年、コンピュータを利用した数値解析の普及に伴い、屋外温熱環境の数値解析が数多く行われている<sup>文1-5)</sup>。しかし、これらの研究の多くの場合、1) 乱流モデルの精度に関する検討が不十分であること<sup>文2,4)</sup>、2) 水蒸気輸送を解かない場合が多い<sup>文2)</sup> 等不十分な点が多い。本研究では1) 乱流熱フラックスの評価への浮力効果の組み込み<sup>文6,2)</sup> 建物風上での乱流エネルギーの過大生産の抑制<sup>文7,8)</sup> を目的として筆者らが開発した改良型 k-ε モデルに基づく対流・放射・湿気連成解析プログラムに水蒸気輸送の方程式を組み込み、これにより市街地の速度場、温度場、放射場、湿度場を解析した。更に、その結果から SET\* の分布を算出し、緑化が夏季の都市環境に及ぼす影響について検討した。

### 2. 計 算 概 要

#### 2.1 街区モデル (図 1)

同一形状の立方体建物モデル (1 辺 30 m) で構成される均等街区を想定。

#### 2.2 気象条件 (図 1)

東京の7月23日午後3時を対象とする。この時の太陽位置を図1中に示す (太陽高度は45.2°)。風向は南風。法線面直達日射量は765 W/m<sup>2</sup>、水平面天空日射量は136 W/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 (74.6 m) の風速は3 m/s (東京7月の1975~1990年の平均)。

#### 2.3 計算ケース (表 1)

case 1 は筆者らが文献1で示したのと同様の考えに基づ

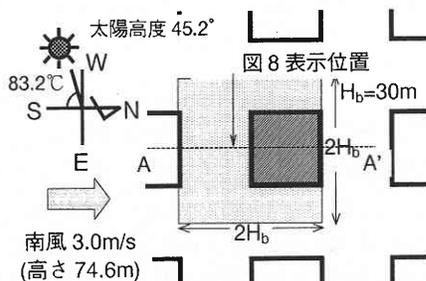


図 1 解析領域

表 1 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1)	標準 k-ε	地表面の緑地率が10%	0.03	一定(相対湿度58%)
case2	改良 k-ε ①<u <sub>3</sub> , θ>の評価への浮力効果	であると想定した場合 (緑地率10%)		絶対湿度 (総水分混合比)の輸送方程式を解く
case3	果の組み込み <sup>文6)</sup> ②建物風上でのkの過大生産を抑制 <sup>文7,8)</sup>	地表面が全て緑地であると想定した場合 (全面緑地)	0.3 (緑地の蒸発効率:0.3)	

\*東京大学生産技術研究所 第5部  
\*\*東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター  
\*\*\*新潟工科大学

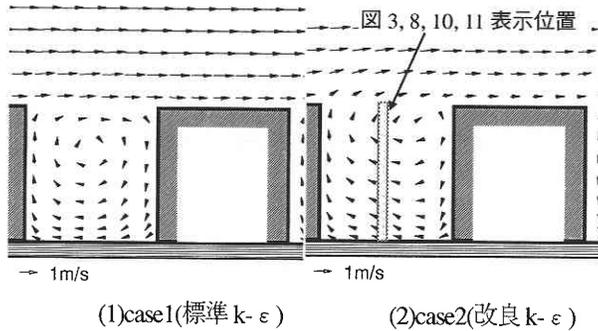


図 2 風速ベクトル図 (鉛直断面)

く計算であり、地表面の緑地率を 10% と想定している。case 2 は case 1 と同じ土地利用条件で、1) 改良 k-ε モデル<sup>文 6-8)</sup> の導入、2) 絶対湿度 (総水分混合比) の輸送方程式<sup>文 9, 10)</sup> の導入<sup>注 1)</sup> を行った case である。一方 case 3 では全ての地表面が緑地に覆われた場合を想定し、case 2 と同じ手法で解析している。

2.4 乱流モデル

case 1 は Viollet 型の標準 k-ε モデル。case 2, 3 では、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 k-ε モデル<sup>文 6)</sup> を使用<sup>注 2)</sup>。さらに、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 Launder-Kato モデル<sup>文 7, 8)</sup> も併せて組み込んだ<sup>注 3)</sup>。

2.5 計算概要<sup>文 14)</sup>

1) 放射及び対流計算 まず、日射計算により地表面、建物の日射取得エネルギーを求め、これと長波放射、顕熱輸送量、潜熱輸送量、熱伝導量からなる熱収支を解き、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>注 4)</sup>。放射計算の詳細は既報<sup>文 1, 14-16)</sup> を参照されたい。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 (総水分混合比) を求めた。

2) MRT の算出 中村ら<sup>文 11)</sup> に倣い、人体を微小立方体とみなして MRT を算出した<sup>注 5)</sup>。

3) SET\* の算出 Gagge ら<sup>文 12)</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。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 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 Met (ゆっくりした歩行と立位静止時の中間) とした。

3. 計算結果

3.1 改良 k-ε モデルの導入効果 (case 1 と case 2 の比較)

図 2 に風速ベクトルの鉛直断面を、図 3 に図 2 中に示す循環流域内中央での風速の鉛直成分  $\langle u_3 \rangle$  の鉛直分布を示す。case 1 に比べ、case 2 では循環流域内の  $\langle u_3 \rangle$  がかなり大きい。図 4 に気温の鉛直分布を示す。case 2 では case 1 に比べ、循環流域内で約 0.5°C 程度気温が低い。こ

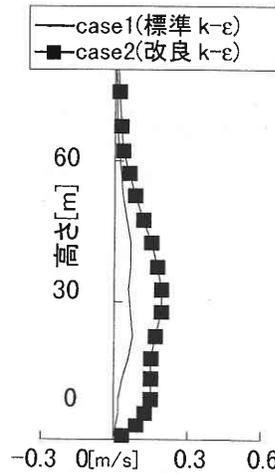
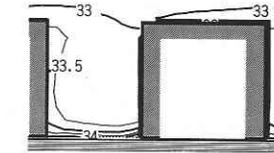
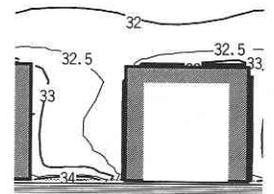


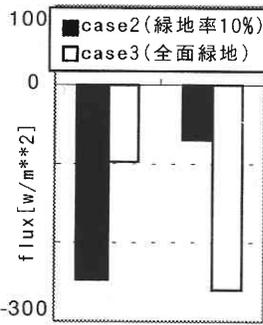
図 3  $\langle u_3 \rangle$  の鉛直分布



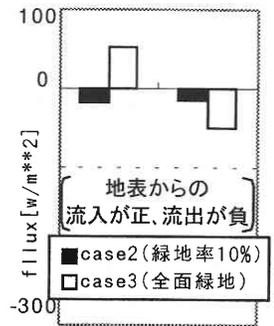
(1) case 1 (標準 k-ε)



(2) case 2 (改良 k-ε)

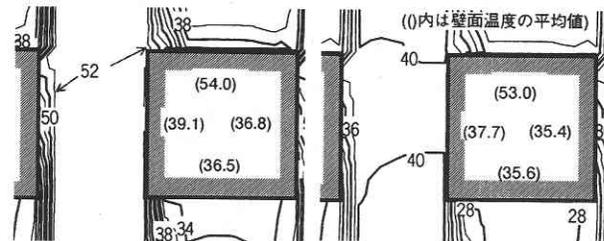


(1) 日照部



(2) 日影部

図 5 地表面の顕熱及び潜熱フラックス



(1) case 2 (緑地率 10%)

(2) case 3 (全面緑地)

図 6 地表面温度分布

これらの差は、主として case 2 において改良型 Launder-Kato モデルを用いたために、case 1 (標準 k-ε) の結果に存在する k の過大生産が抑制されたことにより生じる。図は示さぬが、case 2 (改良 k-ε) では、case 1 (標準 k-ε) 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ており、このため case 2 では、乱流粘性が減少して風速が増大したものと考えられる。従って case 2 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 case 1 に比べ低めとなる (図 4)。以下、この改良 k-ε モデルを用いて case 2 (緑地率

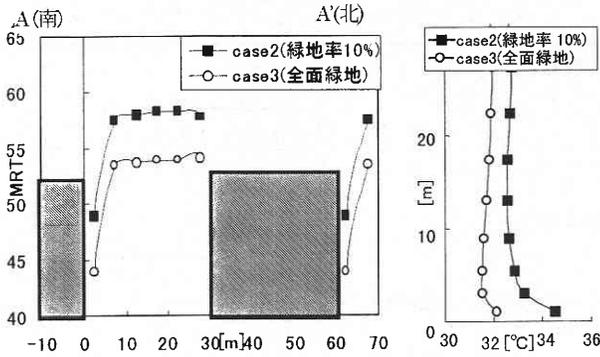


図7 高さ3mのMRT分布

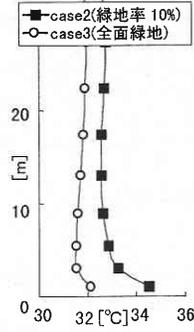


図8 気温の鉛直分布

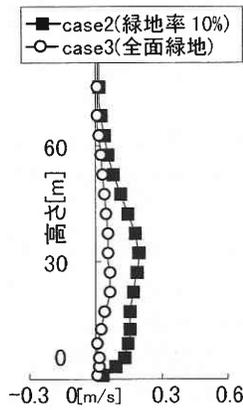


図10  $10 \langle u_3 \rangle$  の鉛直分布

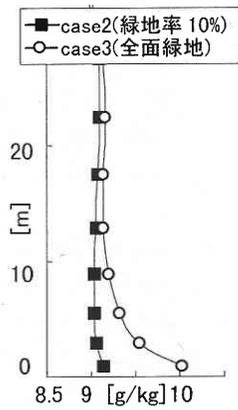


図11 絶対湿度の鉛直分布

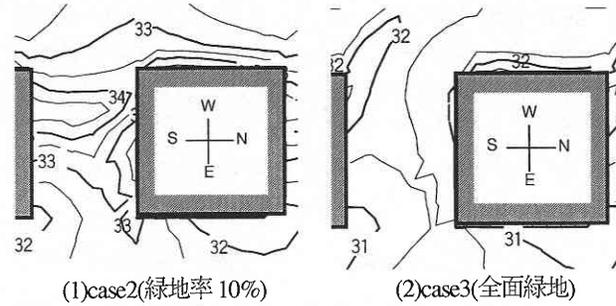


図9 気温分布 (高さ3m)

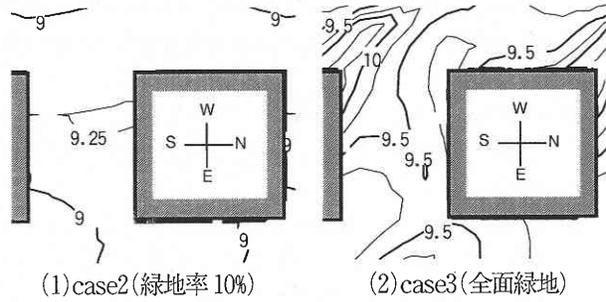


図12 絶対湿度分布 (高さ3m)

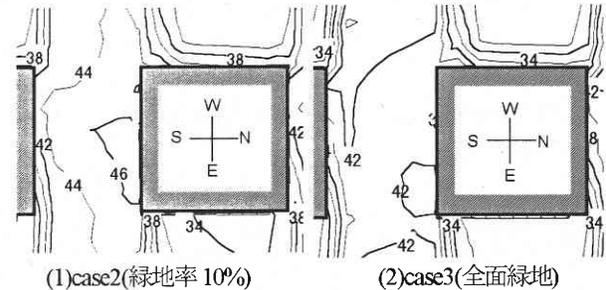


図13 SET\*の空間分布 (高さ3m)

10%) と case 3 (全面緑地) を比較する。

3.2 緑地率の変化の影響 (case 2 と case 3 の比較)

1) 地表面熱収支及び温度 (図5, 6) 図5に日照部及び日影部の地表面の顕熱・潜熱フラックスの比較を示す。ここで正值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、case 2 (緑地率10%) と比べてcase 3 (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5 (1))。これは、case 3の方が蒸発効率が大幅に大きいためである。その影響からcase 3の地表面温度 (図6 (2)) は、case 2 (図6 (1)) より日照部で約14°C、日影部で約6°C温度が低下している<sup>注6)</sup>。そして、この地表面温度の低下により、case 3の顕熱フラックスの絶対値は日照部でcase 2に比べて約150 W/m<sup>2</sup>程度減少している (図5 (1))。

2) MRT分布 (図7) 図7に循環流域内高さ3mのMRTの主流方向の分布を示す。case 3 (全面緑地) ではcase 2 (緑地率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温度が低いためである。

3) 気温分布 (図8, 9) 図8に循環流域内の気温の鉛直分布を示す。循環流域上方においても、case 3 (全面緑地) ではcase 2 (緑地率10%) に対して地表付近で約2.5°C、

上空で約1.2°C程度気温が低い。図9にcase 3の高さ3mの気温の水平分布を示す。case 3 (全面緑地) ではcase 2 (緑地率10%) より循環流域内で2.5~3°C程度気温が低い。

4) 風速分布 (図10) 図10に循環流域内の風速の鉛直成分の $\langle u_3 \rangle$ 鉛直分布を示す。case 3の方がcase 2よりも全般に風速の鉛直成分の絶対値が約0.1 m/s程度小さい。これはcase 3では気温の全般的な低下 (図9 (2)) により、 $\langle u_3 \rangle$ の輸送方程式中の浮力項 $-g_3 \beta \langle \theta \rangle$ が小さくなったためである。

5) 絶対湿度分布 (図11, 12) 図11に図8, 10と同じ表示位置での絶対湿度の鉛直分布を示す。case 3 (全面緑地) の方がcase 2 (緑地率10%) より地表面付近において、約0.9 [g/kg]程度絶対湿度が高く、顕著な差が生じている。図12に絶対湿度の高さ3mの水平分布を示す。case 2, 3共に循環流域西側で絶対湿度が高い。

6) SET\* 分布 (図 13) 図 13 に高さ 3 m の SET\* の空間分布を示す。両 case 共に日照部と日影部で非常に顕著な差が見られる。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。又、今回の計算においては case 3 (全面緑地) では case 2 (緑地率 10%) に対して約 3 ~ 5°C 程度 SET\* が低くなるという結果となった。

4. 結 論

- (1)  $\langle u_3' \theta' \rangle$  の評価への浮力効果及び建物風上側の乱流エネルギー  $k$  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、緑地率 10% の場合を想定した case 2 に対して、地表面全てが緑地とした case 3 では、SET\* が約 3 ~ 5°C 程度低下した。

注

注 1) 絶対湿度 (総水分混合比) の輸送方程式は次式の通り<sup>9,10)</sup>。

$$\frac{\partial \langle q \rangle}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( - \langle u_i' q' \rangle \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$- \langle u_i' q' \rangle = \frac{v_i}{\sigma_w} \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial x_i} \dots \dots \dots (2)$$

$q$ : 絶対湿度 (総水分混合比) [g/kg] = 1.0

注 2) 文献 6 で筆者らの提案した改良型  $k-\epsilon$  モデルでは、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 ((3) 式) から出発し、簡略化したものを用いている文 13)。

$$\langle u_i' \theta' \rangle = - \frac{k}{\epsilon} \left[ C_{\theta u} \langle u_i' u_i' \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_k} + C_{\theta \omega} \langle u_i' \theta' \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} + C_{\theta \beta} \beta \langle \theta'^2 \rangle \right] \dots (3)$$

既報<sup>5,6)</sup> より (3) 式右辺第 2 項の寄与はほとんど無視できるのでこれを除外し、右辺第 1 項に通例の渦粘性近似を適用すると次式となる。

$$\langle u_i' \theta' \rangle = \frac{v_i}{\sigma_\theta} \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j} - \frac{k}{\epsilon} C_{\theta \beta} \beta \langle \theta'^2 \rangle \dots \dots \dots (4)$$

(4) 式右辺第 2 項が今回新たに導入する浮力効果を

表 2 改良 L-K モデルの基礎方程式

1. 標準  $k-\epsilon$  :

$$P_k = v_i S^2 \quad (5) \quad v_i = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6) \quad S = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad (7)$$

2. LK モデル:

$$P_k = v_i S \Omega \quad (8) \quad (v_i: \text{eq. (6)}) \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad (9)$$

$$3. \text{改良 LK: } P_k = v_i S^2 \quad (\Omega/S > 1 \text{ の場合}) \quad (10)$$

$$P_k = v_i S \Omega \quad (\Omega/S \leq 1 \text{ の場合}) \quad (11)$$

考慮した付加項である。

ここで  $C_{\theta 1} = 0.25$ ,  $C_\mu = 0.09$ , より  $\sigma_\theta = 0.5$ .

(4) 式右辺第 2 項中の  $\langle \theta'^2 \rangle$  は輸送方程式より算出する。

注 3) Launder-Kato モデル<sup>7)</sup> (以下 L-K モデル) は、表 2 に示すように乱流エネルギー  $k$  の輸送方程式中の生産項  $P_k = v_i S^2$  を  $P_k = v_i S \Omega$  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 3 (7), (9) 式)。しかし、L-K モデルをそのまま用いると  $\Omega/S > 1$  の領域での  $P_k$  を過大評価することになる。筆者らの提案する改良 L-K モデルで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 (10), (11) 式に示す様に、 $\Omega/S \leq 1$  の領域に限定している<sup>8)</sup>。

注 4) 建物壁体の熱伝導率は、建物壁体の熱コンダクタンス  $5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、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 5) 既報<sup>1)</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 6) 尾島ら<sup>17)</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 case 2 (緑地率 10%) で約  $52^\circ\text{C}$ 、case 3 (全面緑地) で約  $38^\circ\text{C}$ 、顕熱フラックスは case 2 で約  $250 \text{ [w/m}^2]$ 、case 3 で約  $100 \text{ [w/m}^2]$ 、潜熱フラックスは case 2 で約  $70 \text{ [w/m}^2]$ 、case 3 で約  $260 \text{ [w/m}^2]$  という値を示す。周囲の環境、気象条件が異なるとはいえ、実測と本計算では傾向的に良い対応が得ら

れた。

(1997年11月11日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 持田, 村上, 大森, 富永, 1994. 10, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 1245-1248.
- 2) 伊藤, 洞田, 森川, 西村, 1996. 9, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 957-958.
- 3) 西岡, 松尾, 1996. 9, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 533-534.
- 4) 足永, 浅枝, ヴタンカ, 1996. 9, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 577-578.
- 5) 浦野, 西村, 梅干野, 飯野, 1996. 9, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 591-592.
- 6) 大岡, 村上, 持田, 富永, 野口, 1994. 10, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 1241-1244.
- 7) B.E.Launder, M. Kato, 1993.6, ASME Fluid Engineering Conference, 20-24.
- 8) 近藤, 村上, 持田, 1994. 12, 第8回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 363-366.
- 9) Yamada. T. and S. Bunker, 1989, Journal of Applied Meteorology, 28, 545-554.
- 10) 近藤, 1994, 水環境の気象学, 朝倉書店.
- 11) 中村, 1987. 6, 日本建築学会計画系論文報告集, 第376号, 29-35.
- 12) A. P. Gagge et al., 1986, AHSRAE Transactions, 92 (1), 709-731.
- 13) B. E. Launder, 1988, Journal of Heat Transfer, vol. 110.
- 14) 吉田, 村上, 持田, 富永, 大岡, 足永, 1997. 8, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集 1265 ~ 1268.
- 15) 大森, 村上, 加藤, 1994. 9, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 927-928.
- 16) 大森, 村上, 加藤, 1994. 10, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 265-268.
- 17) 高, 三浦, 尾島, 1994. 2, 日本建築学会計画系論文報告集, 第456号, 75-83.