

## 都市高温化予測評価ツールとしての建築一都市一土 壤連成系モデル

谷本, 潤  
九州大学大学院総合理工学研究科環境エネルギー工学専攻

萩島, 理  
九州大学大学院総合理工学研究科環境エネルギー工学専攻

片山, 忠久  
九州大学大学院総合理工学研究科環境エネルギー工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17479>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 20 (4), pp.329-334, 1999-03-01. 九州大学大学院総合理工学研究科  
バージョン :  
権利関係 :

# 都市高温化予測評価ツールとしての 建築—都市—土壌連成系モデル

谷本 潤・萩島 理・片山 忠久\*

(平成10年11月26日 受理)

## A Study on Architecture —Urban— Soil Simultaneous Simulation Model, Predictive Assessment Tool for Significant Air Temperature Rising in Urban Areas

Jun TANIMOTO, Aya HAGISHIMA and Tadahisa KATAYAMA\*

Significant air temperature rising in urban areas is well recognized as so-called Heat Island phenomenon in a global scale. It is qualitatively grasped that increase of anthropologic heat and alternation of land usage are regarded as its main reasons. To analyze quantitatively on factors of the significant air temperature rising, Architecture-Urban-Soil Simultaneous Simulation Model (AUSSSM) was proposed as a predicting methodology by authors in former studies. In this paper several sub-models to attach AUSSSM were reported in order to revise and improve its performance as a numerical predicting simulator. A new sub-model supported by a series of experimental data for practical prediction of evaporative rate from earth surface was introduced. Additionally, an original new sub-model was presented to estimate transient evaporative cooling effect on artificial covering such as building surface, asphalt pavement and so forth. These revisions will lead AUSSM to less erroneous significantly.

### 1. 緒 言

著者の研究室では頃来、都市高温化の要因解析を目的として建築—都市—土壌連成系モデルに関する研究を継続してきている<sup>1)2)</sup>。建築—都市—土壌連成系モデルは、都市高温化要因として想起されてきた都市のエネルギー消費密度と地表面改変、双方の影響を定量的かつ客観的に評価することで、都市高温化に及ぼす建築計画的、建築設備的、都市計画的影響を明らかにしようとするものである。建築伝熱・熱負荷計算サブモデル、植生サブモデル、土壌蒸発フラックスサブモデル、都市大気サブモデルから構成されている各サブモデルに関しては、夫々のバランスを按分しながら理論構成を図り、全体を完全連成系として取り扱っている点が本モデル最大の特徴である。本稿では、建築—都市—土壌連成系モデルの一層の精度向上を図るため、土壌蒸発フラックスサブモデルのリバイズを行い、加えて新たに付加すべく人工被覆蒸発比サブモデルを開発したので、その概要について報告するものである。

### 2. 土壌蒸発フラックスサブモデルのリバイズ

既報のサブモデルでは土壌表層30cmを1点集中定数化した水分収支式で表現し、30cm深奥との水分授受を無視した水分的には閉じた底面境界を仮定している。

\*環境エネルギー工学専攻

換言すれば、このことは現行サブモデルにあつては土壌厚の有限性を前提としており、一般の半無限土壌への適用には一定の誤差を含む。具体的には、砂のような粒径の大きな土壌種にあつては表層土壌から深奥への重力透水の影響は大きく、逆に粘土の如き細粒径の土壌種にあつては乾燥進行時の土壌深奥から表層部分への拡散による水分供給の影響が無視し得ない<sup>3)4)</sup>。その点を勘案して、リバイズしたサブモデルでは、表層土壌30cmにおける1点集中定数化水分収支式を(1)、(2)式にて表す。

$$\gamma_s \cdot \Delta x \frac{d\phi}{dt} = P - EV - GD + C \quad (1)$$

$$\phi \leq \phi_{sat} \quad (2)$$

$\gamma_s$  : 表層30cm土壌比重量 [kg/m<sup>3</sup>] (ただし、 $\gamma_s = (1 - \phi)^{-1} \cdot \gamma_{dry}$  ここで、 $\gamma_{dry}$  : 土壌の絶対乾比重量 [kg/m<sup>3</sup>])、 $\Delta x$  : 表層土壌厚 (=30cm) [m]、 $t$  : 時刻 [h]、 $P$  : 降水フラックス [kg/m<sup>2</sup>h]、 $EV$  : 蒸発フラックス [kg/m<sup>2</sup>h]、 $GD$  : 重力透水フラックス [kg/m<sup>2</sup>h]、 $C$  : 拡散による水分供給フラックス [kg/m<sup>2</sup>h]、 $\phi$  : 重量含水率 [kg/kg]、 $\phi_{sat}$  : 飽和重量含水率 [kg/kg]

土壌表層部分からの下向きフラックスとしては拡散の影響もあり得るが、ここでは一括して  $GD$  で表しておく。表層土壌厚は土壌種に不依30cmとし、厚30cm

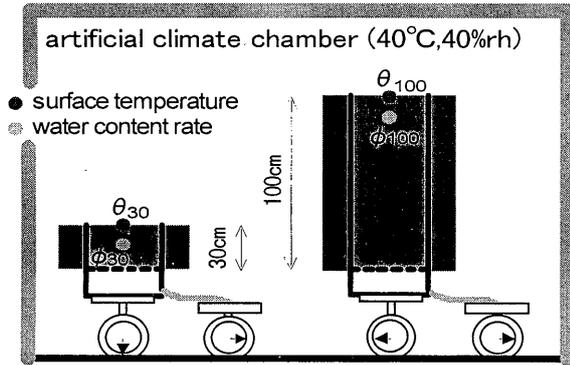


Fig. 1 Schema of the experiment in artificial climate chamber to identify  $GD, C$

に対する蒸発比—正規化含水率特性曲線を用いて  $EV$  を算出し、土壌表層より深奥部分との水分のやり取りは全て  $GD, C$  で表現することで、一般半無限土壌へ適用しようとするものである。以上の方法において、蒸発比—正規化含水率特性および  $GD, C$  は、土壌種ごとにあらかじめ実験的に特定しておく必要がある。

蒸発比—正規化含水率特性については、土壌厚による特性の差異等を含めてその結果の大部は既に3)4)で報告済みである。 $GD, C$  については、Fig. 1に示すような人工気候室内実験により求める。重力透水フラックスに対して下端を開放したシリンダー30cm, 100cmを用意し、1次元性を仮定するため周囲は十分な断熱を施しておく。先ず双方とも下端を閉じて充分飽和に近い含水状態にエイジングせしめ、然るのち下端を開放して蒸発量（シリンダーを載せた重量計の指示値、それぞれ  $W_{eva,30}, W_{eva,100}$  とする）と重力透水による下端流出水重量（それぞれ  $W_{gra,30}, W_{gra,100}$  とする）の単位応答を同時に測定する。土壌種によっては開始後2, 3日後に上端より給水フラックスを付与して、再び飽和に近い状態に復さしめ実験を続した。重量変化量に加え土壌表面温度（30cm, 100cmの試験体それぞれを  $\theta_{30}, \theta_{100}$  とする）、表層30cmを代表する深さ15cmの含水率（30cm, 100cmの試験体それぞれを  $\phi_{30}, \phi_{100}$  とする）を測定する。ここで、100cmシリンダーからの蒸発量を半無限土壌からの蒸発量に等しいと仮定するならば、実験的に求まる  $GD, C$  は

$$GD(\phi) = W_{gra,30} \quad (3)$$

$$C(\phi) = \Delta x \cdot \gamma_s(\phi_{100}) \cdot \frac{\Delta\phi_{100}}{\Delta t} + W_{eva,100} + GD(\phi_{100}) \quad (4)$$

となる。ただし  $\Delta x = 0.3[m]$  とする。また、 $W_{eva,30}$  と  $\phi_{30}$  から先述の下端開放時の蒸発比—正規化含水率特性を得る。結果の一部を Fig. 2, Fig. 3 に示す。 $GD$  は重力透水係数に水の比重を乗じた次元を有し

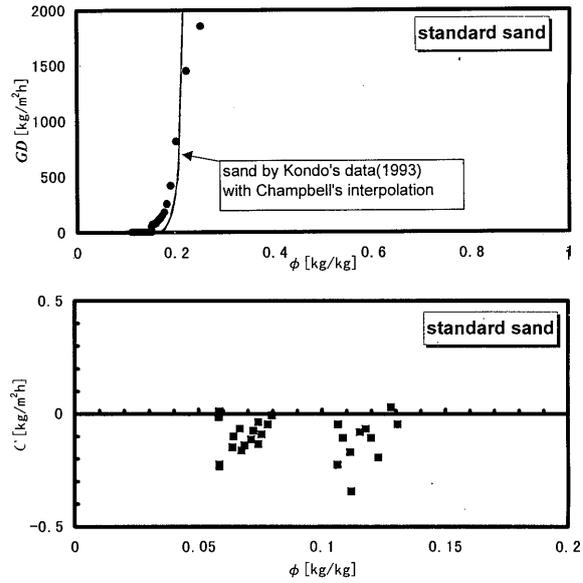


Fig. 2  $GD$  and  $C$  of standard sand

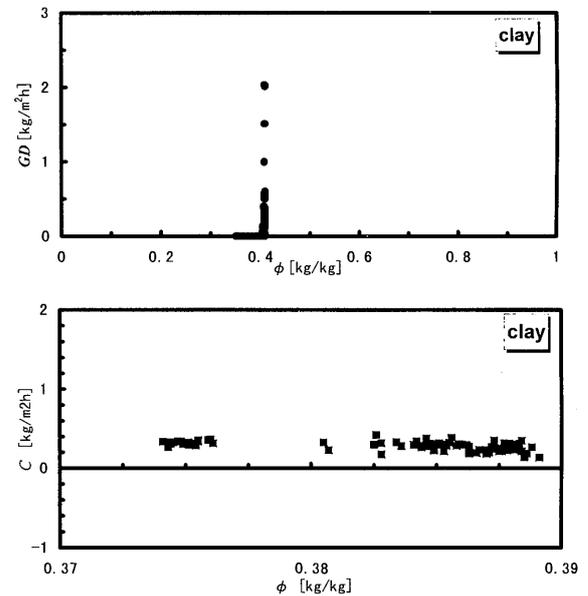


Fig. 3  $GD$  and  $C$  of clay

大略類似の特性を示す。けい砂（Standard Sand）に併記して近藤らによる砂のデータを Campbell の式を仮定して示したが、詳細な土壌種の違いにも不拘、両者は概ね類似の傾向を示している。粘土（工業用カオリン, Clay）に比較してけい砂の  $GD$  が2桁以上大きいのは定性的には首肯できるものだろう。また、 $GD$  が大きいけい砂、の  $C$  は粘土のそれに比較して値はごく小さくかつ負値を示す。これは、(4)式を見ても明らかのように  $C$  は  $GD$  を用いて間接的に求めることもあって、測定誤差に埋もれ易く、けい砂の結果については殆ど無視し得るほど  $C$  は小さいと判定すべきであろう。逆に粘土の  $C$  は相対的に精度よく

求められていると判断される。また、何れの土壌種にあっても  $C$  には含水率特性を認め難いが、これは拡散とは本来、土壌表層部分と深奥部分との含水率差により生じるものであるからだろう。従って、粘土の結果についても、測定誤差のオーダーを考えると全含水率域で平均を取って定値付与するを妥当と考えている。

### 3. 人工被覆蒸発比サブモデルの付加

都市スケールの計算を行う場合は、アスファルト、コンクリートなどの舗装面や建築壁体等は常時乾き面を仮定するのが一般的だろう。勿論、建築単体までスケールを落とせば建築壁体の熱水分同時移動方程式に基づく精算は充分可能であり、例えば降水を考慮した室内熱負荷計算理論も既に確立されている<sup>9)</sup>。しかし、本研究の趣旨からすれば、人工被覆に熱水分同時移動解析を適用するは鶏を割くに牛刀をもってすの感がある。都市スケールで観てこの人工被覆面からの蒸発潜熱が有意となるのは降水直後の過渡的状況だけであるから、これを何とか簡易的に考慮できないかと云うのが本章の内容である。

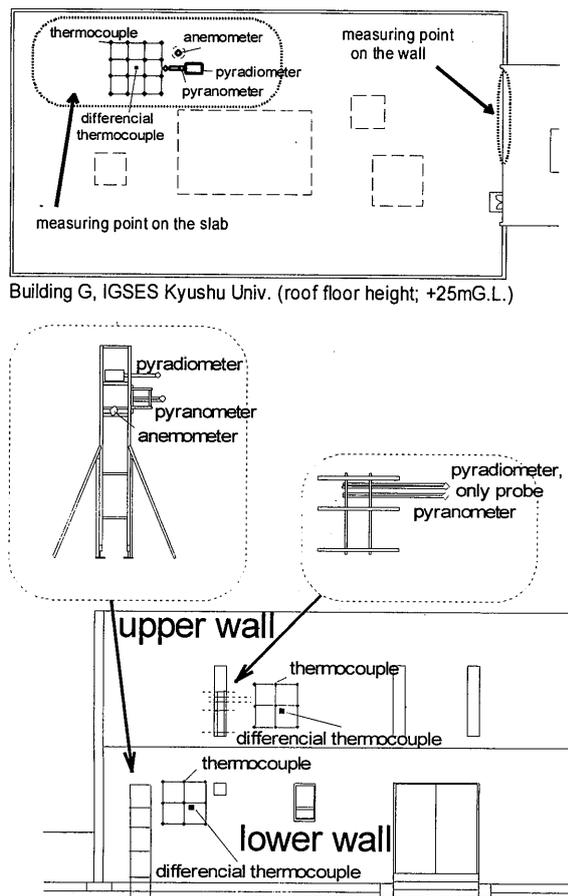
本研究で提案する人工被覆蒸発比サブモデルでは、屋外実験により一般的人工被覆について降水直後の蒸

発比の過渡応答を気象条件から推定しようと云うものである。今回の実験では **Fig. 4** に示すように、九州大学筑紫地区キャンパス大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻棟（総理工G棟）屋上スラブ（RC+防水モルタル仕上げ、以下水平面とする）とペントハウス鉛直壁面（RC+ペイント吹き付け仕上げ、上下2箇所について測定、以下鉛直面（壁上部）、鉛直面（壁下部）とする）を測定対象とした。本研究では当該測定対象面が都市の人工被覆として如何程の代表性を有するかが重要な問題となる。これらの被覆面が人工被覆面として、果たして一般的か否かは議論の分かれるところだろうが、ごく大雑把に観て第1次近似としては適当であろうと判断している。少なくとも水平面として取り上げた屋上スラブに関しては、アスファルト防水等も存在する建物屋上面からコンクリートやアスファルト舗装面まで含めた水平人工被覆面全般の平均的特性を議論するに、まずは差し支えなからうと考えている。鉛直壁面については、コンクリート打ち放しやカーテンウォールなど様々な壁面仕上げが存在する現実の deviation に考えを致せば、これをもって標準的な鉛直面の特性であるとは必ずしも強弁できないが、鉛直面に設置されたガラスや金属表面からの蒸発の過渡的影響はごく僅少であろうから、今回の結果が平均からやや過大側に偏した値を与えていることを十分に認識しておけば結果自体に有意性が失われることはないものと判断した。

実験では、まず非降水時のデータを基に、放射収支量、伝導熱流を表面熱収支式に代入した残差項として対流成分を算出し、近傍風速等を説明変量とした表面対流熱伝達率の実験式を求めておく。ここで“近傍風速等”としたのは詳細には放射収支量の多寡や対流熱流束の向きによって場合分けが必要となるからで、さらにこれらの実験式を月別に求めることで、推定精度の確保に十分配慮する。測定項目としては、これらに加えて対象面表面温度、空気湿温度、対象面入射日射量、降水量などである。一方、降水後の濡れ面時においては、得られた表面対流熱伝達率の実験式を用いて対流成分を求め、熱収支式の残差項として蒸発成分を算出し、さらにこれから蒸発比を求める。

**Fig. 5** は得られた表面対流熱伝達率を用いて晴天日について対流成分を求め、その結果表面熱収支に残留する誤差を水平面について示したものである。多少の残差を認めるが降水直後の蒸発潜熱過渡応答を求めるには充分な精度が得られている。

**Fig. 6** は降水後の晴天日の一例として9/24の蒸発比の時変動特性を水平面と鉛直面（壁下部）について示したものである。日射の影響で蒸発比の推定値が安定する時刻以降を示してある。水平面については蒸発



**Fig. 4** Detail of measuring points

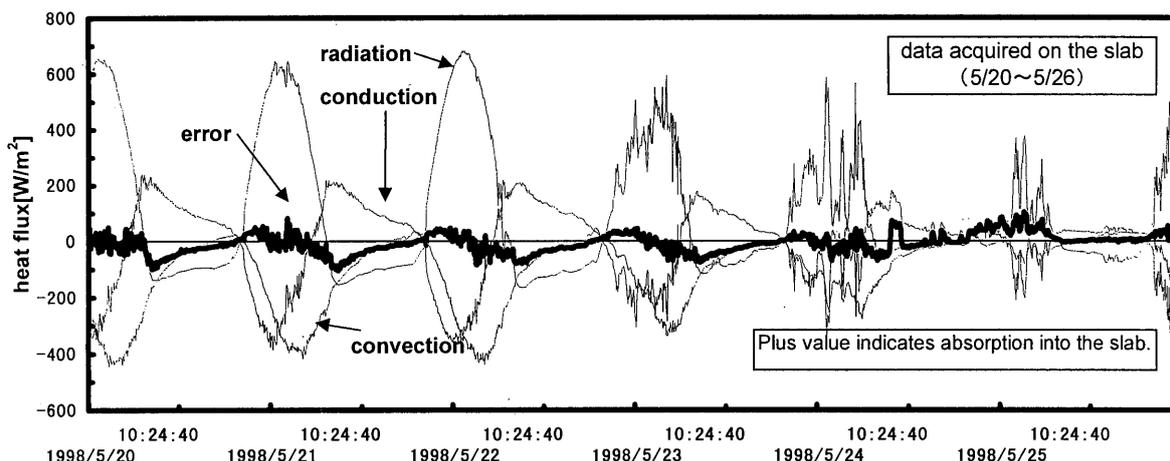


Fig. 5 Observed heat balance with error on the slab

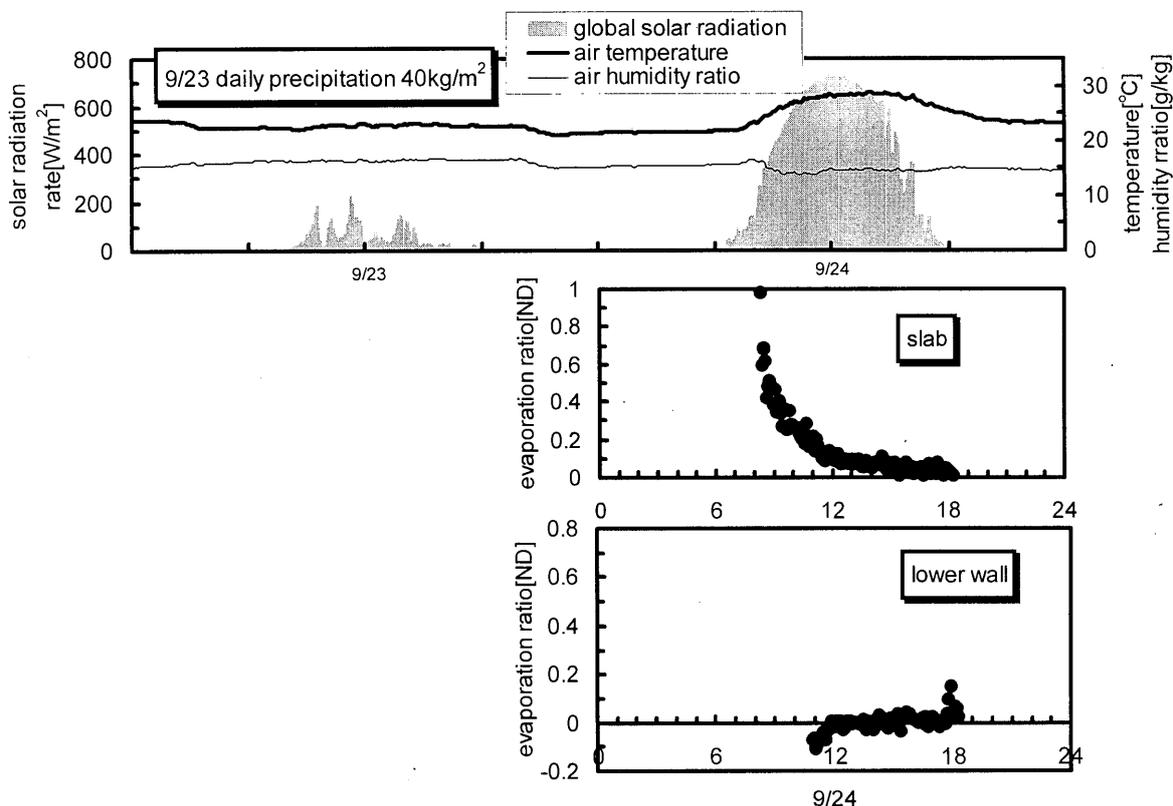


Fig. 6 Obtained evaporation ratio from 9/24 data

比が1近傍の値から減衰していく様子が明瞭に観取れるが、鉛直面については殆ど0を這っていることが特徴的である。鉛直面は風向、風速に応じて壁面に入射する正味の降水量が異なり、その絶対量は水平面に比して著しく小さいことと撥水性の壁面仕上げの影響が主たる原因だろう。Fig 7には晴天日(10/10)の日中に撒水した場合の蒸発比の過渡応答を示す。自然条件下では不明瞭であった鉛直面の蒸発比も明確に観察されるが、水平面と比較してその初期値小、減衰大

なのは、表面仕上げと重力の影響により壁面に保持され蒸発に有効に作用する水分量としては僅少であることに起因するのだろう。既述の如く現実の都市においてはカーテンウォールなど更に濡れ面となりにくい壁面構成が存在することを考え併せると、降水直後の過渡的状态にあっても鉛直面からの蒸発の効果は総じて小さいと観て差し支えなからう。以下では、水平面の蒸発比を特に解析対象として話を進める。

Fig. 8はこれまで自然降水により得られた10日と撒

水2日 (10/5,10/10), 合計12日について蒸発比の初期減衰特性を示したものである。経過時間の起点は蒸発比の推定値が安定し, かつ減衰を開始する時刻を取っており, 撒水2日以外は日射の影響が発現し始める朝

方になっている。日中に撒水した10/5, 10/10の減衰が大きく, 対してその他が小さいことから, 気温, 日射, 絶対湿度など蒸発を促す気象要素の影響を窺わせる。

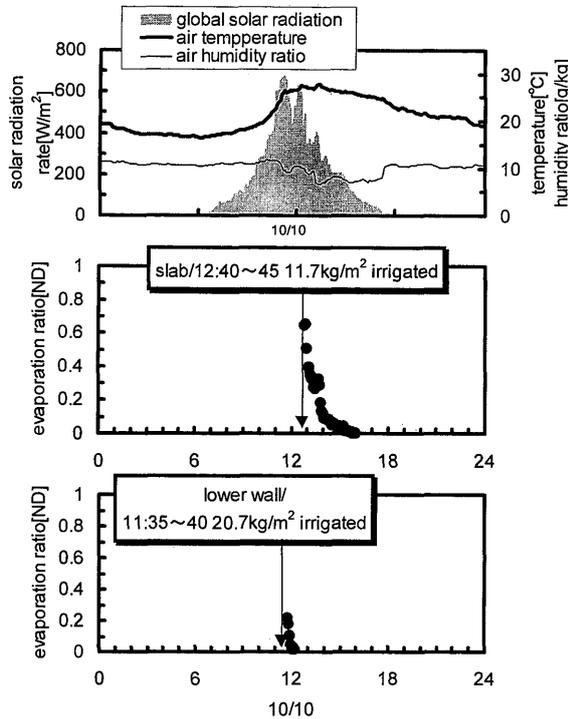


Fig. 7 Obtained evaporation ratio from 10/10 data

そこで, Fig. 8 の各データセットごとに減衰開始後2時間について原点を通る回帰直線を求め, その傾きを気象側要素で予測することを試みる。説明変数として減衰開始後2時間の等価飽差と初期蒸発比を取って, 重回帰した結果を Table 1 に示す。等価飽差の定義は対流熱伝達率 $23.2\text{W/m}^2\text{K}$ , 日射吸収率1とした相当外気温度に対する飽和絶対湿度と空気絶対湿度の差であり, 物理的な意味はないが気温, 日射, 絶対湿度全ての影響を含んだ蒸発のし易さを表すもので, 未来の値であっても境界条件として付与されることを前提にすれば気象要素から算出可能な量である。測定データの誤差等を勘案すれば, ほぼ満足すべき説明の程度であろうと判断している。

さて, 次は初期蒸発比の予測であるが, これには過去の降水の履歴が大きく影響することが予想され, かつ減衰開始直近の降水ほど影響大, 過去に遡及するほどその間に蒸発し去る成分が生じるため影響は薄れると考えられよう。そこで, 初期蒸発比を目的変数に, 0.5mm以上の降水が生起してからの経過時間とその間の等価飽差の時間平均値を説明変数にして重回帰を行い Table 2 を得た。ここでの等価飽差の定義は, 外

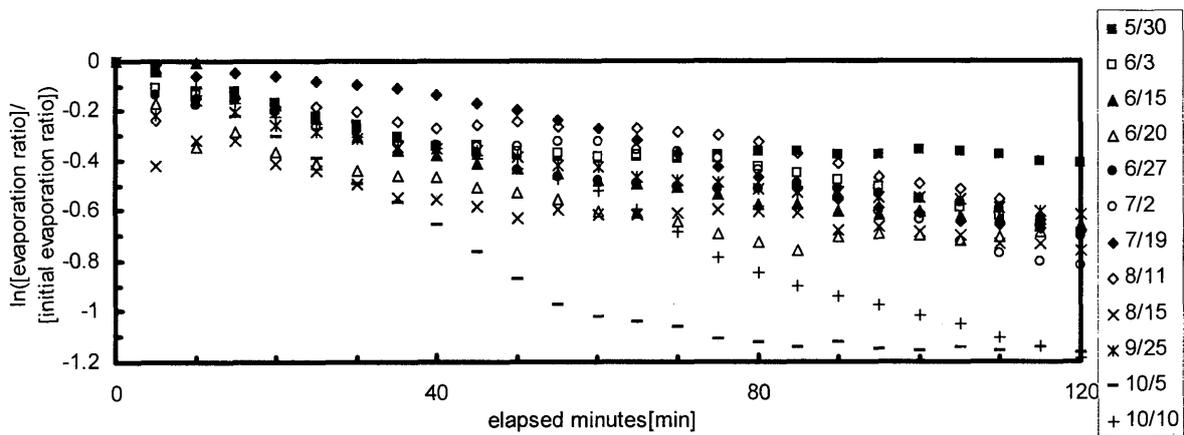


Fig. 8 Dumping characteristic of obtained evaporation ratio

Table 1 Multiple regression analysis to predict dumping coefficient  $a$

Dumping model of evaporation ratio :  $r_e(t) = r_{e,t=0} \exp(-a \cdot t)$   
 where  $r_e(t)$  : evaporation ratio time  $t$  [ND],  $r_{e,t=0}$  : initial evaporation ratio [ND]  
 Multiple regression line :  
 (dumping coefficient  $a$ ) =  $6.94 \times 10^{-5} \cdot$  (equivalent difference of humidity ratio between saturated surface and air [g/kg])  
 $+ 1.03 \times 10^{-3} \cdot$  (initial evaporation ratio [ND])  
 $+ 4.99 \times 10^{-3}$   
 multiple correlation coefficient  $R=0.595$

**Table 2** Multiple regression analysis to predict initial evaporation ratio  $r_{e,t=0}$ 

Multiple regression line :	
(initial evaporation ratio ratio $r_{e,t=0}$ )	$= -6.40 \times 10^{-4} \cdot$ (elapsed minutes from rainfall more than 0.5mm [min])
	$-1.29 \times 10^{-2} \cdot$ (time average value of equivalent difference of humidity ratio between saturated surface and air [g/kg])
	+1
	multiple correlation coefficient $R=0.859$

気温度に対する飽和絶対湿度と空気絶対湿度の差である。きわめて良好な回帰結果となった。Table 2の重回帰式で、例えば日中の晴天時に突如の降水があり、その後天候回復、即座に蒸発比減衰が始まる状況を想定するならば、その初期蒸発比は1となることは自明である。

以上により、外界気象条件だけで降水後減衰開始時の初期蒸発比、減衰2時間の減衰率が推定可能となった。減衰開始2時間以降については、その値は最早十分に小さいから、例えば日没時に蒸発比0になるとして線形内挿補間しても大過なからうと思う。鉛直面については既述のように常時乾き面とすればよい。

#### 4. 結 言

建築—都市—土壌連成系モデルの精度向上を目的とした土壌蒸発フラックスサブモデルのリバイズ、人工被覆蒸発比サブモデルの付加について述べた。

現在、都市大気サブモデルについても、現行の接地層内のモニン・オブコフ相似則に基づく1次元熱収支モデルから鉛直1次元の運動量、エネルギー、水分輸送方程式に基づく0方程式モデル（混合距離モデル）にリバイズすべく、風洞模型実験を行っている。結果については稿を改めて報告したい。

本研究の一部は総理工奨励研究プロジェクト研究

「建築—都市—土壌連成系モデルによる都市高温化の要因解析に関する研究」の助成を受けた。また、実験およびデータ解析の遂行に際しては研究室の学生である笠間幹雄君、河上貴子君、森竹千景君、大原健志君、月松幸司君の協力を得た。記して謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) 谷本・林・片山・大濱・笠間, 建築—都市—土壌連成系モデルによる都市高温化要因の定量的比較に関する研究第1報 理論構成手法と基本解, 日本建築学会計画系論文集 第504号, pp.87-93, 1998.
- 2) 谷本・林・片山・大濱・笠間, 建築—都市—土壌連成系モデルによる都市高温化要因の定量的比較に関する研究第2報 数値実験による要因効果特性解析, 日本建築学会計画系論文集 第510号, pp.53-60, 1998.
- 3) 河上・片山・林・谷本・萩島・笠間, 都市熱環境評価のための地表面からの蒸発量の簡易計算手法に関する研究その4 土壌種による蒸発特性の実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.127-128, 1998.
- 4) 笠間・片山・林・谷本・萩島・河上, 都市熱環境評価のための地表面からの蒸発量の簡易計算手法に関する研究その5 重力透水, 水分拡散の影響を考慮した簡易計算手法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.129-130, 1998.
- 5) 近藤他, 大都市における夏季高温化対策技術の評価手法の開発, 資源環境技術総合研究所環境影響予測部, 1997.
- 6) 尾崎明仁, 降水の影響を考慮した建築の熱負荷に関する研究, 学位論文 (九州大学), 1990年.