改良・建築一都市一土壤連成系モデル(AUSSSM)による 都市高温化の構造解析

第1報 モデルの理論構成及び標準解

AN ORGANIC ANALYSIS FOR QUANTITATIVE ESTIMATION OF HEAT ISLAND BY THE REVISED ARCHITECTURE-URBAN-SOIL-SIMULTANEOUS SIMULATION MODEL, AUSSSM

Part 1 Theoretical frame of the model and results of standard solution

萩島 理*, 谷本 潤**, 片山忠久***, 大原健志****
Aya HAGISHIMA, Jun TANIMOTO, Tadahisa KATAYAMA
and Kenji OHARA

As a marvelous predicting and estimating methodology for the Heat Island in an urban area, *Architecture-Urban-Soil Simultaneous Simulation Model*, AUSSSM was entirely established. The revised AUSSSM is evolved from the former proposed AUSSSM by not only replacing but also newly adding several sub-models. Each sub-model expresses complex phenomenon such as one-dimensional vertical distribution of air temperature, wind velocity and humidity ratio in urban canopy, artificial heat generation from buildings and traffic, evapotranspiration from vegetation, transient evaporation from artificial surfaces shortly after precipitation, dynamic performance of cooling load and HVAC system in buildings. These sub-models have been developed in authors' former works. One of the most important features of AUSSSM is the fact that each sub-model has relatively same level of its accuracy, which leads practically correct and significant solution under the constraint of limited computational resource. And following theoretical description, the Standard Solution assuming a business district in Tokyo was presented.

key words : numerical simulation, heat island phenomenon, *Architecture-Urban-Soil-Simultaneous Simulation Model*, AUSSSM

数値計算、ヒートアイランド現象、建築一都市一土壤連成系モデル AUSSSM

1. 目的

近年の急激な都市の高密度化と拡大に伴い、各地でヒートアイランド現象の顕在化が観測されている。大都市の多くが温暖地域に位置する日本では、夏季の気温上昇をもたらす空調負荷の増加は、電力消費の年間ピーク値上昇をもたらすため、都市高温化の有効な緩和策が社会的に強く求められている。このような背景から、数値シミュレーションによる都市高温化予測の研究が精力的に行われてきている。

例えば、金ら¹⁾はメソスケールモデルを用いた数値計算により、関東地方における大規模な土地利用変化に伴う気候変動の予測を行っている。数値モデルの骨子は、Mellor Yamada Level2.5 の3次元乱流モデルであり、市街地、森林、水面等の土地被覆は粗度長、アルベド、蒸発効率、人工排熱の4つのパラメータにより表現されている。メッシュサイズは水平方向8km、鉛直方向は20m程度で、建物と大気との間の熱及び流体の輸送メカニズムは大胆に省略されているため、大規模な土地利用変化が及ぼす都市気候への影響を評価するには好適である一方、街区スケールの都市高温化抑制手法の有効性検討は難しいため、ミクロスケールの数値モデルとのネスティングが試みられている²⁾。

一方、従来から建築分野では、大気側については粗度高さにお

ける気温と接地層上端の気温をモニオブコフの相似則を仮定した熱抵抗で接続する、所謂1次元熱収支モデルが用いられてきた³⁾。筆者らが既報⁴⁾にて報告した建築一都市一土壤連成系モデル(*Architecture-Urban-Soil Simultaneous Simulation Model* 以下AUSSSMと略記)においても、都市大気には1次元熱収支モデルを採用して、土壤、建物の伝熱モデルとの連成計算を行った。ここでは、従来まで静的取り扱いがなされていた自然地被の蒸発特性について、表層土壤の湿り具合による蒸発比の変化を考慮したサブモデルを採用している点が特徴の一つであった。しかし、これらの1次元熱収支モデルには次の2つの問題が指摘されている。即ち、第1は、都市キャノピー空間におけるモニオブコフの相似則の成立は確認されていない点⁵⁾、第2は計算の結果得られる粗度高さにおける「気温」の定義が抽象的にならざるを得ない点である。

これに対して、大気については1次元または2次元の乱流モデルを採用し、街路間放射伝熱や建物からの人工排熱を考慮したモデル⁶⁾⁷⁾も提案されている。都市大気、建物、土壤のモデル化の手法は研究者により様々ではあるが、いずれもメソスケールモデルでは考慮できない街区スケールの影響を考慮できるという利点を有する。

* 九州大学大学院総合理工学研究院 助手・工修

** 九州大学大学院総合理工学研究院 助教授・工博

*** 九州大学大学院総合理工学研究院 教授・工博

**** 穴吹工務店 工修

Research Assoc., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., M. Eng.
Assoc. Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.
Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.
Anabuki Construction Inc., M. Eng.

図1 建築—都市—土壌連成系モデル AUSSSM の模式図(温度計算点)

これまでの先行研究により、都市高温化の主要因が緑地等の自然地被面の減少と人工排熱量の増加である事は、定性的には広く認識されるに至っているが、既報⁴⁾でも述べた通り、都市計画、建築設計、設備設計において優先すべき都市高温化抑制策は何か、という具体的方向性を示し得る定量的データの蓄積についてはいまだ十分とは言えないのが現状である。

そこで、本研究では、都市高温化要因の定量化を目的として、既報の AUSSSM を大幅に改訂し精緻化を施した「改良・建築—都市—土壌連成系モデル(AUSSSM)」の構築を行う。続いて、AUSSSM を用いた多数回の数値実験を行う。数値実験では既報⁴⁾同様、実験計画法を用いる。AUSSSM の改良にあたっては、都市高温化抑制手法として現在位置づけられている自然地被面からの蒸発、空調システムの性能、建物形状、建物断熱性能、内部発熱量、屋上芝生植栽をはじめとする因子を出来る限り漏れ無く数値モデルに反映できるように留意する。尚、高温化要因効果の定量化に必要な多数回の数値実験を行うために筆者らが別途数年来提案してきた簡易モデルを組み込むことで、計算負荷の抑制を図る。

図2 AUSSSM で想定する街区形状

本稿では、まず改良・建築—都市—土壌連成系モデル AUSSSM の理論構成について詳述するとともに、AUSSSM による標準解の結果を述べる。

2. AUSSSM の概要

AUSSSM の模式図を図1に示す。AUSSSM は、都市大気、土壌、建物の3つのサブモデルからなり、全体を完全連成系として取り扱っている。都市高温化要因の定量化即ち都市高温化抑制手法の定量的評価を目的とする本研究においては、限られた計算機

表 1 大気サブモデルの基礎式

輸送方程式	$m \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial (K_m \cdot m \frac{\partial u}{\partial z})}{\partial z} - \frac{1}{2} c a u ^2 \dots \dots \dots (1)$	$m \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial (K_h \cdot m \frac{\partial \theta}{\partial z})}{\partial z} + H \dots \dots \dots (2)$	$m \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial (K_v \cdot m \frac{\partial q}{\partial z})}{\partial z} + W \dots \dots \dots (3)$
乱流拡散係数	$R_f < R_k; \quad K_m = l^2 \left \frac{\partial u}{\partial z} \right \frac{S_M^{3/2}}{\sqrt{C}} (1 - R_f)^{1/2} \dots \dots \dots (4)$	$K_h = K_v = l^2 \left \frac{\partial u}{\partial z} \right \frac{S_M^{1/2}}{\sqrt{C}} S_H (1 - R_f)^{1/2} \dots \dots \dots (5)$	
	$S_M = \frac{1 - C_2}{C_1^2} \left(\frac{HB}{G} \right) \left(\frac{R_{f1} - R_f}{R_{f2} - R_f} \right) \left(\frac{R_{f3} - R_f}{1 - R_f} \right) \dots \dots \dots (6)$	$S_H = \left(\frac{B}{CC_1 C_W} \right) \left(\frac{R_{f1} - R_f}{1 - R_f} \right) \dots \dots \dots (7)$	
	$R_f \geq R_k; \quad K_m = K_h = K_v = l^2 \left \frac{\partial u}{\partial z} \right \dots \dots \dots (8)$		
乱れの長さスケール	$z < H_{canopy}; \quad l = 2k^3 \frac{1}{ca} \{1 - \exp(-k\eta)\} \dots \dots \dots (9)$	$\eta = ca \frac{z}{2k^3} \dots \dots \dots (10)$	
	$z \geq H_{canopy}; \quad l \propto kz \dots \dots \dots (11)$		

【記号】 u : 風速[m/s], θ : 空気温度[K], q : 比湿[kg/kg], H, W : 生成項, K_m, K_h, K_v : 乱流拡散係数, c : 抵抗係数[-]

R_f : フラックスリチャードソン数, R_k : 限界フラックスリチャードソン数(=0.25), l : 混合長, k : カルマン定数(=0.4)

$R_{f1}=R_k=0.29, R_{f2}=0.33, R_{f3}=0.45, C_1=1.5, C_2=0.65, G=2.32, C_W=3.2, B=2.67, H=2.67, C=0.203$

m : 流体体積密度[-], a : 単位流体体積当たり建物立面積[1/m] B : 建物幅, W : 街路幅, H_{canopy} : 建物高さ

$$m = 1 - \left(\frac{B}{B+W} \right)^2; \quad z \leq H_{canopy}; \quad a = B / ((B+W)^2 - B^2); \quad z \leq H_{canopy}$$

資源の制約下で、都市計画、建築計画、設備計画上の様々な因子を網羅的にモデルに組み込む必要があるため、都市大気と建物及び土壌との相互作用について、精粗のバランスに十分配慮したモデルが必要となる。そこで、AUSSSMでは、同一形状の直方体建物が等間隔に無限に並ぶ理想的な都市を想定し、大気側に鉛直1次元モデルを採用している。また、土壌サブモデル及び建築サブモデルは、1次元の熱伝導方程式を基本としている。

想定する都市の街区形状を図2に示す。街区形状については整形及び千鳥の2種類の建物配列を考慮している。

3. 都市大気サブモデル

都市大気サブモデルは、地表100m⁽¹⁾までの接地境界層を対象として、鉛直1次元の熱、運動量及び水蒸気の輸送方程式で表現される。都市大気サブモデルの基礎式を表1に示す。

建物の抗力の影響は、流体体積密度と抗力項により表現されるキャノピーモデルに基づき、(1)式の右辺第2項で表される。抵抗係数 c は丸山⁽⁹⁾により、図3に示す通り粗度体積密度の関数で定義される。尚、筆者らは、直方体模型群の整形配列及び千鳥配列、市街地模型を用いた風洞実験を行い、2次元k-εモデルに丸山の抵抗係数を組み込んだ数値計算の鉛直プロファイルがキャノピー層内において実験結果と概ね一致する事を確認している⁽¹⁰⁾。

乱流モデルは、Gambo⁽⁶⁾によるゼロ方程式で(4)~(7)式で表される。乱れの長さスケールは、キャノピーの影響を考慮した近藤のモデル⁽¹¹⁾に基づき式(9)(10)で算出する。

4. 土壌サブモデル

4.1 土壌加熱

キャノピー空間の底部は、アスファルト、土壌、芝生の3種類の地被状態を想定し、地中0.5mを温度指定境界とする1次元の熱伝導方程式により表現される。表面における入射放射量は、後述する街路間放射場との連成による繰り返し計算で考慮される。

図3 抵抗係数と粗度体積密度の関係

大気への顕熱量は、アスファルト、土壌、芝生の面積割合を考慮して、各表面温度と大気側地表第1層空気温度との差をポテンシャルとして算出する。尚、アスファルト、土壌表面の対流熱伝達率についてはユルゲスの式、芝生面については芝生試験体を用いた実測データ⁽¹²⁾に基づき風速の関数とする。

4.2 土壌からの蒸発量⁽¹⁴⁾

完全ぬれ面からの蒸発量に対する土壌蒸発量の割合を表す蒸発比 re の変動を表層0.1mの土壌含水率の関数で定義する簡易手法を用いる。この手法は土壌中の水分計算点が表層1点で済むため、熱水分同時移動方程式に基づく従来の解法に比べ大幅に計算負荷を減らすことが可能である。土壌表層部分の水分収支式は次のように表現される。

$$\gamma_s \cdot \Delta x \frac{d\phi}{dt} = P - EVS - GD(\phi) + C \dots \dots \dots (12)$$

$$\phi \leq \phi_{sat} \dots \dots \dots (13)$$

$$\gamma_s = (1 - \phi)^{-1} \cdot \gamma_{dry} \dots \dots \dots (14)$$

$$EVS = re(\phi/\phi_{sat}) \frac{\alpha}{C_p} (X_{sat} - X_{ar}) \dots \dots \dots (15)$$

ここで、 ϕ : 土壌の重量含水率[kg/kg], ϕ_{sat} : 飽和含水率[kg/kg], $\Delta X=0.1m$, γ_s : 土壌の密度[kg/m³], γ_{dry} : 土壌の絶対乾密度[kg/m³], P : 降水量[kg/m²s], EVS : 蒸発量[kg/m²s], C : 拡散による水分供給[kg/m²s],

図4 正規化含水率と蒸発比の関係(埴壌土)

図5 重量含水率と重力透水の関係(埴壌土)

GD 重力透水[$\text{kg/m}^2\text{s}$], re :蒸発比[-], X_{air} :絶対湿度[kg/kg], X_{surf} :表面温度基準の飽和絶対湿度[kg/kg], k_x :物質移動係数[$\text{kg/m}^2\text{s}\cdot\text{kg/kg}$]

重力透水 GD 及び蒸発比 re と土壌含水率 ϕ の関係式は、二層系熱水分同時移動方程式に基づく数値計算結果を精解として既報¹⁴⁾にて土壌種毎に同定を行っている。本稿で用いる埴壌土の蒸発比及び重力透水と含水率との関係を図4及び図5にそれぞれ示す。

4.3 芝生からの蒸発散量¹⁵⁾

芝生表層における熱収支式は、葉群層を熱容量無しで熱抵抗を持つと仮定し、次式で表現する。

$$SR + LR + CD + CV + l \cdot EVL = 0 \quad (16)$$

$$CD = \frac{1}{ETR} (T_{surf} - T_{st}) \quad (17)$$

$$EVL = \kappa \cdot EVS \quad (18)$$

ここで、 SR :短波放射量[W/m^2], LR :長波放射量[W/m^2], CD :伝導熱量[W/m^2], CV :対流熱伝達量[W/m^2], ETR :等価的熱抵抗[$\text{m}^2\text{K/W}$], T_{surf} :芝生葉表面温度[K], T_{st} :葉根元温度[K], EVL :蒸発散量[$\text{kg/m}^2\text{s}$], l :相変化熱[J/kg]

κ は同じ条件下におかれた裸土に対する芝生の蒸発量の比で土壌含水率の関数で与えられる。 ETR 及び κ は試験体を用いた屋外長期実測¹³⁾から同定を行っている。

4.4 アスファルト舗装面からの蒸発量¹⁵⁾

通常人工被覆面は乾き面として蒸発を無視した取り扱いをするのが一般的であるが、降水直後の過渡的蒸発の影響を考慮するため、筆者らが別途提案している蒸発比簡易予測手法を用いる。降水後に表面付近の空隙に蓄えられる水分の収支式は、完全ぬれ面からの蒸発量に対する人工被覆面からの蒸発量の割合を表す蒸発比 re を用いて次式で表現する。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -E \quad (19) \quad \text{但し } t=0 \text{ において } \phi = \phi_{max}$$

$$E = re \cdot k_x \cdot (X_s(T_s) - X_a) \quad (20)$$

$$re = \phi / \phi_{max} \quad (21)$$

ここで、 ϕ :表面に付着する水分量[kg/m^2], ϕ_{max} :表面に付着する最大水分量[kg/m^2](アスファルト舗装面 $\phi_{max}=0.30$ アスファルトシート防水の場合 $\phi_{max}=0.45$), E :蒸発量[$\text{kg/m}^2\text{s}$], t :降水後の経過時刻[s], re :蒸発比[-], $X_s(T_s)$:表面温度 T_s に対する飽和絶対湿度[kg/kg], X_a :空気絶対湿度[kg/kg], k_x :物質移動係数[$\text{kg/m}^2\text{s}\cdot\text{kg/kg}$]

5. 建築サブモデル

建築サブモデルは建物熱負荷計算を基礎とし、壁体とガラス窓から構成される直方体の建物を想定している。建物は、地下室、1階、中間階、最上階の計4室から成り、中間階は吹き抜けの大空間としている。

5.1 建物伝熱及び熱負荷

建物の壁面と屋根面は方位と階毎に1次元熱伝導方程式に基づき求める。室内への透過日射の屋外への再放射考慮せず、各階床スラブに全て吸収されると仮定している。室内の長波放射量の授受は総合熱伝達率により考慮している。建物外壁面、道路表面における対流熱伝達率は、ユルゲスの式に街路内風速を代入して求める。尚、屋上芝生植栽以外の屋上スラブ面については、前述のアスファルト舗装面と同様に、(19)~(21)式により降水後に過渡的に生じる蒸発量を考慮している¹⁵⁾。

建物の顕熱負荷 H_s , 潜熱負荷 H_l は次式で表される。

$$H_s = \sum_{4 \text{ directions}} S_i \cdot \alpha_i \cdot (T_{set} - T_{s,i}) + S_f W_s + S_f V_{air} C_{air} \rho_{air} (T_{set} - T_o) \quad (22)$$

$$H_l = l_w S_f V_{air} \rho_{air} (X_{set} - X_o) + S_f W_l \quad (23)$$

ここで、 W_s :内部発生顕熱量[W/m^2], S :面積[m^2], α_i :室内総合熱伝達率[$\text{W/m}^2\text{K}$], l_w :水の蒸発潜熱量[J/kg], V_{air} :新鮮外気導入量[$\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$], C_{air} :空気の比熱[J/kgK], ρ_{air} :空気の密度[kg/m^3], W_l :内部発生潜熱量[W/m^2], 添字 i :壁, f :床, set :空調設定値, o :外部空気

中間階は、(建物の想定階数-2階)の床面積に相当する内部発熱量及び換気量としている。尚、換気に伴ってキャノピー空間内の温度及び比湿計算点には、次式で示す熱量及び水蒸気が均等に付与される。

$$H_v = S_f V_{air} C_{air} \rho_{air} (T_{set} - T_o) \quad (24)$$

$$W_v = S_f V_{air} \rho_{air} (X_{set} - X_o) \quad (25)$$

5.2 空調機器からの排熱量¹⁶⁾

個別熱源と地域冷暖房について蓄熱槽の有無により4種類の熱源システムで計14種類の空調システムを想定している。本稿で想定した空調システムの種類、COP及び排出熱量の計算方法を表2に示す。空気熱源ヒートポンプ算出の際の COP_{HPair} は、図6に示す下田ら¹⁸⁾による空気熱源ヒートポンプ(HPair)の熱源温度とCOPの関係から決定する。また、負荷変動に伴う性能変化 $irate$ は、高橋ら¹⁹⁾の提案式に基づき定義している。地域冷暖房の水熱源ヒートポンプ(DHC+HPwater)以外の13システムについては、建物熱負荷に $(1+1/COP)$ を乗じて得られる排出全熱量は、室外機の顕熱潜熱処理比を考慮して、都市大気サブモデルの空気温度と比湿の計算点に付与される。顕熱処理比は、亀谷ら¹⁷⁾により、空気熱源ヒートポンプ(HPair)100%、ターボ冷凍機(TR)12.5%、ガス焚

表2 空調システムの種類及びCOP

区分	種類	略記号	COPの算出方法	排出熱量(全熱)の算出方法
個別空調	空気熱源ヒートポンプ	HPair	$COP = COP_{HPair} \cdot lrate$	$Q = (1 + 1/COP) \cdot H_{load}$
	ターボ冷凍機	TR	$COP = 1.60COP_{HPair} \cdot lrate$	
	ガス焚き吸収式冷凍機	AR	$COP = 0.38COP_{HPair} \cdot lrate$	
個別空調 +蓄熱層	空気熱源ヒートポンプ	HST+HPair	$COP = COP_{HPair}$	$Q = 1.1 \times (1 + 1/COP) \cdot H_{preload} / Time$
	ターボ冷凍機	HST+TR	$COP = 1.60COP_{HPair}$	
地域 冷暖房	空気熱源ヒートポンプ	DHC+HPair	$COP = COP_{HPair} \cdot lrate$	$Q = 1.1 \times (1 + 1/COP) \cdot H_{load}$
	ターボ冷凍機	DHC+TR	$COP = 1.60COP_{HPair} \cdot lrate$	
	ガス焚き吸収式冷凍機	DHC+AR	$COP = 0.38COP_{HPair} \cdot lrate$	
	水熱源ヒートポンプ	DHC+HPwater		$Q = 0$
地域 冷暖房 +蓄熱槽	空気熱源ヒートポンプ	DHC+HST+HPair	$COP = COP_{HPair}$	$Q = 1.1 \times 1.1 \times (1 + 1/COP) \cdot H_{preload} / Time$
	ターボ冷凍機	DHC+HST+TR	$COP = 1.60COP_{HPair}$	
	水熱源ヒートポンプ	DHC+HST+HPwater		$Q = 0$

$lrate$: 負荷率変動に伴う性能変化係数¹⁹⁾, $lrate = (-0.0681 \cdot T_{air} + 0.1319 \cdot T_w + 0.0023 \cdot lr + 3.1598) / (-0.0681 \cdot T_{air} + 0.1319 \cdot T_w + 0.0023 \times 100 + 3.1598)$

T_{air} : 室外機または冷却塔の位置における空気温度, T_w : 送・還水温度の中央値(=11℃), lr : 負荷率[%]

COP_{HPair} : 図6より空気温度の関数として与えられる空気熱源ヒートポンプのCOP

H_{load} : 建物全熱負荷[W], $H_{preload}$: 前日の建物熱負荷合計[J], $Time$: 蓄熱運転時間[s]

図6 空気熱源ヒートポンプの熱源温度とCOPの関係¹⁸⁾

き吸収式冷凍機(AR)11.3%とする。但し、ガス焚き吸収式冷凍機(AR)については、ガス燃焼に伴う水蒸気発生量を別途考慮し、大気の比湿計算点に付与する。地域冷暖房の水熱源ヒートポンプ(DHC+HPwater)については、海水や河川水への排熱による水面温度上昇は無視できるものと考え、空気への排熱量ゼロとする。

尚、蓄熱槽を有するシステムでは負荷率100%、蓄熱ロス1割、地域冷暖房については配管ロス1割を考慮している。

6. 街路間放射

交差点部分の路面、それ以外の路面を3×3、建物壁面4方位をそれぞれ3×3の格子に分割し、面対面の形態係数により各格子間の放射計算を行う。各格子への一次入射日射量は、格子を10×10に分割した細分格子中心点における直達日射の有無を各々判定して得られる日影面積率と、天空率から求める。反射日射量については、ラジオシティ法によりキャノピー構成面を一様拡散面と仮定して繰り返し計算を行い、多重反射した日射量が一次入射日射量の1%未満になったら計算を打ち切る。尚、ガラスの1次入射日射の直達成分に対する日射反射率については入射角依存性を考慮している²⁰⁾。長波長放射については、大気放射及び表面絶対温度4乗射出成分を面対面形態係数により考慮し、繰り返し計算により求解する。

表3 標準解と条件

建物形状	建物幅32m、道路幅16.88m、建物高さ23.8m (7階を想定)グロス容積率300%
建物配置	千鳥配列
日射吸収率	壁0.6、舗装道路0.9、土壌0.7、芝生0.75
壁体構成	内断熱、断熱材厚20mm
窓	窓面積率35%、透明ガラス6mm
屋上仕様	被土10cm+芝生植栽
地被状態	アスファルト：土壌：芝生=1：1：1
交通排熱量	ピーク値9.7W/街区m ² で日変動
室内発熱量	ピーク値 顕熱56W/床m ² 潜熱13W/床m ²
空調システム	HPair 30%、TR 31%、AR 39%
空調排熱の 顕熱潜熱処理比 及び放出高さ	HPair 顕熱100%、各階と屋上から均等に排出 TR 顕熱12.5%、潜熱87.5%、屋上から排出 AR 顕熱11.3%、潜熱88.7%、屋上から排出
空調設定	間欠空調(8~21時)、温度26℃、相対湿度60% 換気量2.7m ³ /h

図7 境界条件

7. 標準解

7.1 計算条件

表3に標準解の計算条件を示す。街路形状については、東京の建物状況の調査結果に基づき決定している²¹⁾。交通排熱については、ピーク値及び時変動特性は東京都23区の平均的な値²²⁾としている。建物内部発熱量はオフィスビルの標準的な値とし、時変動

図8 空気温度の鉛直分布

図9 風速の鉛直分布

図10 比湿の鉛直分布

図11 土壌、芝生、アスファルト舗装面の蒸発量の経時変化

図12 土壌、芝生、アスファルト舗装面の表面温度の経時変化

図13 空調排熱(全熱)及び空調システム COP の経時変化

²²⁾を考慮している。空調システムの割合については、亀谷らによる調査結果¹⁷⁾を、空調排熱の放出高さについては、筆者らの調査結果²³⁾を参考にしてそれぞれ決定している。

7.2 境界条件

接地層上端 100m を境界条件として、温度は東京・大手町上空 100m の超過危険率 10%適用夏季設計用データ³⁾、日射量は同じく超過危険率 10%の夏季設計用日射量(東京)データ²⁴⁾を用いる。また、接地層上端における比湿 0.0189kg/kg、風速 5m/s 一定としている。図7に接地層上端における気温及び日射量の境界条件を示す。太陽位置算出にあたっては8月1日、東京を仮定する。

計算周期は7日を1周期とし、各周期の最終日深夜に 20mm の降雨を与えている。14日間の助走計算後、1周期(15～21日)の結果を以下の考察に用いる。

7.3 標準解計算結果

降水翌日(21日目)における気温、風速、比湿の鉛直分布を図8、図9、図10にそれぞれ示す。気温は地表面付近で大きく変動し、接地層上端に近づくにつれなだらかな変化となる。風速は建物高さ 23.8m を境に勾配が変化し、建物により風速が低減されている様子が再現されている。比湿については、日射が当たる9時、13時、17時で、地表面及び屋上芝生植栽が生じる蒸発が影響し、夜間に比べ大きな値を示している。また、屋上付近では空調時にクーリングタワーから排出される水蒸気が影響し、非空調時に比べ高い値となっている。

土壌、芝生、アスファルト舗装面における蒸発量の日変化を図11に、表面温度の経時変化を図12に、それぞれ示す。屋上の芝生は日当たりがよく風速が大きいため、降水直後は最も蒸発が盛んであるが、土壌下方からの水分供給が無い場合、晴天が連続する間に乾燥し急速に蒸発量が少なくなっている。また、キャノピ

一底部に位置する芝生は土壌に比べ常に大きな蒸発量を示している。アスファルト舗装面に関しては、深夜の降水後から翌日の朝までの間で蒸発が生じているが、表面温度に与える影響は概して小さい。

図 13 に降水翌日(21 日目)における空調機器からの排出熱量(全熱)及び各システム COP の経時変化を示す。実際には、この排出熱量は顕熱潜熱処理比に応じて大気へ排出される。各システムについて比較すると、HPair、TR に比べ、COP の低い AR からの排出量が多くなっている。また、HPair と TR とでは、TR のシステム割合の方が高いにも関わらず、HPair の方が排出量は多い。これは両者の COP 特性に起因している。

8. 結論

本稿では都市高温化要因の定量化を目的として既報のモデルを全面的に見直した改良・建築—都市—土壌連成系モデル(AUSSSM)の理論構成について詳述するとともに、標準解の計算結果について報告した。

AUSSSM は、都市大気、土壌、建物の 1 次元サブモデルから成り、都市高温化抑制手法と考えられる諸因子を網羅的にモデルに組み込んでいる点が特徴である。高温化要因効果の定量化に必要な多数回の数値実験を行うために、筆者らが別途数年来提案してきた簡易モデルを組み込むことで、計算負荷の抑制を図っている。

次報では、AUSSSM を用いて、実験計画法に基づく数値実験を行い、都市高温化要因の定量的効果を明らかにする。

謝辞

空調システムの排熱特性に関して大阪大学下田吉之先生より大変貴重なご教示を頂いた。ここに記して深謝の意を表する。本研究の一部は文部省科学研究費・地域連携推進研究「地域熱供給計画支援都市熱環境シミュレーターの開発」(代表片山忠久、課題番号 11792017)に拠る。

注記

- 1) 本稿では、接地層上端における温度と風速の境界条件に東京タワーでの観測データに基づく高さ 100m における気温³⁾を用いているため、大気の計算領域を 100m 固定として取り扱っている。
- 2) 従来の AUSSSM⁴⁾と本稿における改良・AUSSSM の主な相違点は次の通りである。
 - 大気サブモデルを 1 次元熱収支モデルから 1 次元キャノピーモデルに変更
 - 土壌サブモデルにおける表層土壌厚 Δx 、蒸発比 $re - \phi \phi_{max}$ の関係式を数値実験による同定結果¹⁴⁾に変更
 - 土壌サブモデルに表層土壌から下層への重力透水 GD 、下層からの拡散による水分供給 C を追加
 - 建物屋根面及びアスファルト舗装面における降水後の過渡的蒸発量予測モデル¹⁵⁾を追加
 - 街路間輻射計算の精緻化
 - 空調システムによる排熱特性の違いをモデル化

参考文献

- 1) 金相璣・村上周三・持田灯・大岡龍三・吉田伸治, 数値気候モデルによる都市化がもたらす関東地方の気候変化のメカニズムの解析, 日本建築学会計画系論文集 NO.534, pp.83-88, 2000.8
- 2) 例えば、持田灯・村上周三・金相璣・近藤裕昭・島田昭男・大岡龍三, ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合的評価のための Software Platform の開発(その 1)(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-1), p.1099-1102, 2000
- 3) 例えば、石野久彌・森山正和・水出喜太郎・中山哲士, 1 次元熱収支モデルによる数値計算と地表近傍環境の観測による都市熱環境解析に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 NO.469, P.45-51, 1995.3
- 4) 谷本潤・林徹夫・片山忠久・大濱淳司・笠間幹雄, 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 No.504pp.87-93, 1998.2
- 5) ヴタンカ・足永靖信・浅枝隆, 都市大気境界層の乱流モデリング 都市建築計画における都市気候予測システムの開発 その 1, 日本建築学会計画系論文集 NO.536, pp.95-pp.99, 2000.10
- 6) 近藤裕昭・劉発華, 1 次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究, 大気環境学会誌 第 33 巻第 3 号, pp.179-192, 1998
- 7) 例えば、ヴタンカ・足永靖信・浅枝隆・藤野毅, 都市域の街区スケールにおける気候予測モデルの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-2), p.131-132, 1998
- 8) 近藤明・山口克人・上野恵, 2 次元大気境界層モデルから導かれた都市キャノピー形状とヒートアイランド強度の関係, 大気環境学会誌第 34 巻第 6 号, pp.422-434, 1999
- 9) 丸山敬, 粗面上に発達する乱流境界層の数値シミュレーション その 2 市街地のように粗度形状が複雑な場合, 日本風工学会誌 第 47 号, pp.81-82, 1991
- 10) 萩島理, 片山忠久, 谷本潤, 依田浩敏, 森竹千景, 江副紀子, 都市キャノピーモデルによる数値計算と風洞模型実験との比較, 日本建築学会学術講演梗概集 D-2, pp.1107-1108, 2000.9
- 11) Kanzaburo Gambo, Notes on the Turbulence Closure Model for Atmospheric Boundary Layers, Journal of Meteorological Society of Japan Vol.56, No.5, pp.466-480, 1978
- 12) Tsutomu Watanabe and Junsei Kondo, The Influence of Canopy Structure and Density upon the Mixing Length within and above Vegetation, Journal of Meteorological Society of Japan Vol.68, No.2, pp.227-235, 1990.4
- 13) 香川治美・林徹夫・谷本潤・片山忠久, 芝生植栽が都市熱環境に及ぼす影響に関する研究第 1 報土壌の含水状態を考慮した芝生植栽の蒸発発散特性の定量的特定, 日本建築学会計画系論文集 No.507, pp.7-12, 1998.5
- 14) 萩島理・谷本潤・片山忠久・大原健志, 二相系熱水分同時移動方程式による数値実験に基づく土壌物性値の同定 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 第 2 報, 日本建築学会計画系論文集 No.540, pp.67-72, 2001.2
- 15) 月松孝司, 片山忠久, 谷本潤, 萩島理, 降水後の人工被覆面にお

- る蒸発比減衰モデルの提案 その3 蒸発比減衰モデルの改良, 日本建築学会学術講演梗概集 D-2, pp.351-352, 2000.9
- 16) 谷本潤・萩島理・片山忠久・黒川恵兒, 建築—都市—土壌連成系モデル(AUSSSM)へ接続する建築空調設備システムの取り扱いについて, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集Ⅱ, pp.1053-1056, 2000.9
- 17) 亀谷茂樹・水野稔・下田吉之, 空調設備の年代推移と都市熱環境負荷の変化の推移, 空気調和・衛生工学会論文集 No.67, pp.13-21, 1997.10
- 18) 下田吉之・水野稔・亀谷茂樹・百瀬敏成・金地孝行, 都市未利用エネルギーの活用可能性評価手法に関する研究 第2報 未利用熱源水供給ネットワークの省エネルギーポテンシャル, 空気調和・衛生工学会論文集, No.67, 1997.10
- 19) 高橋淳一・近藤雅史・横尾昇剛・岡建雄, 水熱源システムの熱源機器効率解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.75, 1999.10
- 20) 宿谷昌則, 数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学, 丸善, 1993
- 21) 中村修・宮下康一・植松康・山田大彦, 東京都23区の土地利用数値情報に基づく地表面粗度要素としての街並の実状分析, 日本風工学会誌 No.84, pp.59-69, 2000.7
- 22) 末次忠司・河原能久・木内豪・小林裕明, 都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究(その1)—都市河川等の水熱エネルギー活用の効果—土木研究所資料第3722号 2000.3
- 23) 宮原直枝・片山忠久・谷本潤・萩島理, 建築—都市気候モデルに用いる3次元プラットホームデータの構築に関する研究 その1 排熱3次元分布特性調査と都市形状解析, 日本建築学会九州支部研究報告第40号・2環境系, pp.329-332, 2001.3
- 24) 中山哲士・石野久彌他2名, 1次元熱収支モデルによる都市熱環境解析に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演梗概集, pp.1371-1400, 1995

(2001年5月10日原稿受理, 2001年7月19日採用決定)