都市キャノピーモデルの組み込みによる建物群の影響の反映

MM5を用いた都市気候解析モデルの構築（その2）

INCORPORATING AN URBAN CANOPY MODEL TO REPRESENT
THE EFFECTS OF BUILDINGS

Development of urban climate analysis model using MM5 Part 2

川 本 陽 一*, 大 岡 龍 三**

Yoichi KAWAMOTO and Ryoza OOKA

Urban heat island phenomena have been analyzed by numerous researchers using mesoscale meteorological models. Although there are many mesoscale models, MM5 is considered one of the major mesoscale models. In such analysis, a one-dimensional heat balance model is primarily used for surface boundary conditions. However, it is necessary to include the effect of the building canopy to analyze the thermal environment at pedestrian level. Therefore, MM5 is incorporated with the urban canopy model. The urban thermal environment in Kanto region is analyzed by means of the new method. The results show better agreement with observation data.

Keywords: Heat Island Phenomenon, Urban Climate Analysis, Meso-scale analysis, Urban Canopy model, Outdoor Thermal Environment

ヒートアイランド、都市気候解析、メソスケール解析、都市キャノピーモデル、屋外温熱環境

1. 序

前報（その1）¹⁾に於いて、NCAR（National Center for Atmospheric Research）により提供されるメソスケール気象モデルMM5²⁾を都市気候解析に適用すべく、地表面パラメータの改良を行った。オリジナルのMM5では解析メッシュ内で最も割合の多い土地利用分類で代表させ各種地表面パラメータを設定するが、この手法では狭隘な土地利用が混在する日本の都市を対象とした場合、それぞれの解析メッシュでの土地利用の特性を反映させる事が不可能である。この問題に対し、解析メッシュ内の土地利用の割合に応じて面積加重平均する事により粗度長等の各種地表面パラメータを設定するよう、MM5のプログラムを改良し、都市域の地表面の性状の再現精度の向上を図った。この改良は建物用地の割合に従って建物群を想定した粗度長を設定し、都市の性状を再現する事を試みるものである。しかし、実際の都市に目を向ければ明白な様に、国土数値情報の土地利用分類上で同一の建物用地と分類されている場所に於いても、建物の性状は多彩な様相を示す。例えば、超高層建築群の乱立する都心と戸建て住宅の建ち並ぶ住宅街を同一のパラメータによりモデル化する事に無理がある事は想像に難くない。それらの差異を反映させるために各解析メッシュに於いて、建物形状データを用いて仔細に粗度長をチューニングする事が一つの策として考えられる。しかしこの手法では依然、粗度長を用いて都市の凹凸を再現し、ある水平面での熱収支を解いているため、都市キャノピー層内部の複雑な熱輸送をモデル化するには困難である。また、粗度長により表現される都市上空の物理場は都市キャノピー層より上

空のそれであり、都市キャノピー層内部の、地表近傍の物理場を詳細に解像する事が不可能で、人間の居住範囲での評価が困難である点も依然未解決の問題として残される。従来型のメソスケールモデル、即ち、土地利用データから粗度長を設定し都市をモデル化したメソスケールモデルの課題を総括すると、以下3点となる。1) 土地利用データ中の建物用地の分類では反映されない建物の特性の差異の再現が不可能である。2) 一水平面を仮定し都市を再現しているため、都市キャノピー層内部の熱輸送を再現出来ず、都市キャノピー層からのフラックスの詳細な評価が困難である。3) 粗度長を用いて接地境界層の風速プロファイルを再現するものであり地表に接するメッシュの鉛直高さは粗度長の数倍程度確保する必要があるため、地表近傍を詳細に解像する事が不可能である。1番目の問題は、土地利用データに加え、GIS（Geographic Information System）データを用いて建物形状を取得する事により解決可能である。2番目の問題は、都市の形状をモデル化し反映させ、建物各面での熱収支を計算する事により、解決可能であると考えられる。3番目の問題は、建物及び樹木以外の元来粗度長が小さい土地利用に関しては従来通り粗度長を用い、建物及び樹木に関しては抗力（Form Drag Force）によりその効果を反映させるキャノピーモデルを組み込む事により解決可能であると考えられる。この3つの問題点に関しては従来、メソスケール気象モデル Software Platform^{3, 4)}に於いて改良を行ってきた。しかしながら、ベースとなるメソスケールモデルは静水圧近似を仮定しており、雲や降水等の効果が組み込まれておらず、今後益々拡大するであろう都市環境問題の解析ツールとしては能力不

* 東京大学生産技術研究所 博士研究員・博士(工学)

日本学術振興会特別研究員 PD

** 東京大学生産技術研究所 准教授・博士(工学)

Research Fellow, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Ph. D.

JSPS Research Fellow

Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

足である。従って現在、世界中で多くのユーザを擁するメソスケール汎用モデルである MM5 を都市気候解析に適用すべく検討を行っている。本論文では MM5 に再度都市キャノピーモデルを組み込み、汎用的な都市気候解析モデルを構築する事を目的とする。

名称に差異こそあれ、メソスケールモデルの接地層のモデル化に建物群の効果を統計的に組み込む試みは多く為されている。Ashie *et al.*⁵⁾及び Vu *et al.*⁶⁾は $k-\epsilon$ モデルに基づいた都市キャノピーモデルを3次元に拡張し、メソスケール解析も可能な都市気候予測システムを開発している。Masson⁷⁾は TEB (Town Energy Budget) モデルをメソスケールモデルに組み込んだが、都市キャノピー層からのフラックス予測の精度向上を目的としており、都市キャノピー層内部の気温や風速等の物理場を予測する事は考慮されていない。また、都市の形状データから粗度長を算出しており、都市キャノピーモデルと一般に呼ばれる、抗力項により建物群が流れ場に及ぼす影響を再現するモデルとは異なっている。Kusaka *et al.*⁸⁾による Single-Layer Urban Canopy Model は抗力項により建物群の効果を反映させているが、都市域からのフラックス予測に重点を置いているため、都市キャノピー層内部は解像していない。一方、都市キャノピー層を数層に解像する Multi-Layer Urban Canopy Model としては、Martilli *et al.*⁹⁾によるモデル等が挙げられ、地表近傍の物理場を予測する事が主眼に置かれている。Multi-Layer は接地層内部を分割し解析を行うため、都市の効果の組み込みによる計算式の増加に加え、格子分割数の増加により、解析に係る計算コストの増大は免れ得ない。Single-Layer 若しくは Multi-Layer のどちらを採用するか、と言う問題は興味の対象に起因すると考えられる。即ち、前者は従来のモデルからの計算コストの増加を抑えつつ、都市域からのフラックスを詳細に評価する事でメソスケール解析の精度向上を図り、後者は計算コストの増大を許容し、前者に加えて接地層内部の物理場の評価を目指す。

MM5 への都市キャノピーモデルの組み込みは、Otte *et al.*¹⁰⁾及び Dupont *et al.*¹¹⁾による DA-SM2-U、更に Taha¹²⁾により DA-SM2-U から改良された Urbanized MM5 が既に発表され、利用されている。これらのモデルと本論文で提案するモデルの差異について、その最たる部分は、キャニオン空間の放射の取り扱いであると言える。以前我々が使用していた都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルに於ける放射サブモデル¹³⁾を本論文に於いても用いており、街区を3次元でモデル化し放射計算を行っている。対して DA-SM2-U や UrbanizedMM5、更には Masson、Kusaka *et al.*、Martilli *et al.* によるモデルではキャニオン空間を2次元キャニオンと想定している点が大きく異なる。これは偏に、欧米と日本の街区形状の差異に因ると言える可能性もあり、議論の残る問題であるが、地表面近傍の温熱環境の予測精度に多大な影響を及ぼす日射の影響を詳細にモデル化している点は大きな特徴と言える。

2. モデル概要

2.1. MM5 概要

前報¹⁾に於いて地表面パラメータの改良、及び人工排熱の影響を組み込んだ MM5 を基盤として、近藤ら¹⁴⁾が提案した1次元都市キャノピーモデルに改良を施した物を組み込む。MM5 では惑星境界層 (Planetary Boundary Layer; PBL) スキーム、放射スキーム、

雲微物理スキーム等を選択し利用可能であるが、選択したスキーム・モデルにより使用するソースコードが異なる。MM5 に都市キャノピーモデルを組み込むに先立ち、以下の様に使用するスキーム・モデルを固定しソースコードに改良を施す。

物理モデル：非静力学モデル²⁾

PBL スキーム：Eta PBL scheme^{15, 16)}

放射スキーム：Cloud-radiation scheme¹⁷⁾

地表面スキーム：Five-Layer Soil model¹⁸⁾

2.2. 都市キャノピーモデル及び植生キャノピーモデル概要

都市及び植生キャノピーモデルを組み込む事により、以下の効果をもメソスケールモデルに反映させる。1) 建物群による風速低減、2) 建物群による乱れの増大、3) 建物群による短波放射の伝達、4) 建物群による長波放射の伝達、5) 建物各面からの顕熱・潜熱放散、6) 植生群による風速低減、7) 植生群による乱れの増大、8) 植生群による日射の吸収。各項目に関し、次節以降で説明する。

2.3. 建物群のモデル化

都市キャノピーモデルは、個々の建物・植生を陽に解像し解析するのではなく、統計的に取り扱う事によりそれらがメソスケールの物理場に及ぼす影響を反映させる物である。各解析メッシュ内には図1の様に様に建物群が立ち並ぶと想定し、平均建物幅 (b)、平均建物高さ (h)、平均建物間隔 (w) の3種のパラメータにより表す。

図1 建物群のモデル化

2.4. 都市キャノピーモデル組み込みによる基礎方程式の修正

本論文では、乱流クロージャに Mellor-Yamada Level 2.5 Model¹⁹⁾を用いる Eta PBL スキーム^{16, 17)}に付加項として建物群及び植生群による抗力を与える。Wilson and Shaw²⁰⁾による仮定に基づき、Yamada²¹⁾は Mellor-Yamada Level 2.5 Model に植生キャノピーによる抗力項を組み込んでいる。本論文では Yamada による植生キャノピーモデルを建物群にも拡張する。以下に都市キャノピー・植生キャノピーモデルを組み込んだ基礎方程式を示す。

2.4.1. 運動方程式

MM5 Ver.3 では非静力学モデルのみの解析で、鉛直方向の運動方程式も解く。しかしキャノピーモデルによる抗力は水平方向のみを考慮し鉛直方向では検討しないため、ここでは省略し、水平方向の運動方程式のみを示す。オリジナルの MM5 の方程式については文献2を参照。

MM5 では鉛直座標は σ 座標を用い、以下のように定義される。

$$\sigma = \frac{p_0 - p_t}{p_s - p_t} \quad (1)$$

ここで、 p_s と p_t はそれぞれ参照状態での地表面、及びモデル上端で

の気圧を表し、時間変化しない。また、 $p^*(x, y) = p_s(x, y) - p_t$ とする。

非静力学モデルの水平方向の運動方程式に、下線部で示す都市キャノピーモデルによる抗力項を付加する。

$$\frac{\partial p^* u}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial p^* uu/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vu/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* u \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + uDIV$$

$$- \frac{mp^*}{\rho} \left[\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right] + p^* f_v - p^* ew \cos \theta + D_u$$

$$- \eta C_d a u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p^* v}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial p^* uv/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vv/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* v \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + vDIV$$

$$- \frac{mp^*}{\rho} \left[\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right] + p^* f_u - p^* ew \sin \theta + D_v$$

$$- \eta C_d a v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (3)$$

ここで、 m はマップスケールファクター、 f はコリオリパラメータ、 e は水平方向のコリオリパラメータ、 θ は y 軸と真北との為す角である。 D (Diffusion; 拡散) 項は鉛直及び水平の拡散項と、惑星境界層内の乱流に因る鉛直混合、または乾燥対流調整を表す。抗力項中の η は建物や樹木を含むメッシュの水平面積のうち建物や樹木に覆われている割合、 C_d は建物群や樹冠の抵抗係数 (建物: 0.1、樹木: 0.2)、 a [$\text{m}^2 \text{m}^{-3}$] は建物群の面積密度または樹冠の葉面積密度である^{注1)}。 DIV (Divergence; 発散) 項は、

$$DIV = m^2 \left[\frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right] + \frac{\partial p^* \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \quad (4)$$

と定義される。 $\dot{\sigma}$ は σ 座標での鉛直速度であり、次式で求められる。

$$\dot{\sigma} = -\frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v \quad (5)$$

2.4.2. 乱流エネルギーと乱れ長さスケール

境界層近似を用いた乱流エネルギー (Turbulent Kinetic Energy; TKE) $q^2/2$ と乱れ長さスケール $q^2 l$ の式に、下線部の項を付加する。乱流エネルギー

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{q^2}{2} \right) = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[l q S_q \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{q^2}{2} \right) \right] - \langle uw \rangle \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \langle vw \rangle \frac{\partial v}{\partial \sigma}$$

$$- \beta g \langle w \theta_v \rangle - \frac{q^3}{B_l l} + \eta C_d a (u^2 + v^2 + w^2)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

乱れ長さスケール

$$\frac{d}{dt} (q^2 l) = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[l q S_l \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{q^2 l}{2} \right) \right] - l F_1 \left[\langle uw \rangle \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \langle vw \rangle \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \beta g \langle w \theta_v \rangle \right]$$

$$- \frac{q^3}{B_l l} \left[1 + F_2 \left(\frac{l}{\kappa \sigma} \right)^2 \right] + 2 \eta C_d a l (u^2 + v^2 + w^2)^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

ここで、 S_q 、 S_l 、 F_1 、 F_2 、 β は経験的な定数、 l は乱流の鉛直距離スケール、 θ_v は仮温位、 κ は von Karman 定数である。

2.4.3. 温度及び湿度

建物をモデル化し地表面境界条件に組み込む事で、地表面のみではなく建物表面での熱収支を計算し、各表面からの顕熱・潜熱放散

を温度及び水蒸気の輸送方程式に組み込む。また、外気条件に応じて逐次計算される、建物から空調機器を通して外気に排出される空調排熱、また、産業及び交通からの人工排熱についても、その排出位置・排出形態 (顕熱・潜熱)・排出時間に応じて輸送方程式に組み込む。更に、樹木の樹冠高さにおいては樹冠による日射吸収をモデル化しており、その吸収熱は植生の蒸散過程によって当該メッシュの気温や湿度を上昇させる。ここで、植生が短波放射を吸収して顕熱フラックスと潜熱フラックスに変換するときのボーエン比は 0.2 と仮定している。以下に、人工排熱、空調排熱、建物表面からの顕熱・潜熱フラックスを組み込んだ温度及び水蒸気の輸送方程式を示す。下線部の項がキャノピーモデルにより付加された項である。

温度

$$\frac{\partial p^* T}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial p^* u T/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v T/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* T \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + T DIV$$

$$+ \frac{1}{\rho c_p} \left[p^* \frac{Dp'}{Dt} - \rho_0 g p^* w - D_{p'} \right]$$

$$+ p^* \frac{\dot{Q}}{c_p} + D_T + \frac{1}{\rho c_p} \left(BR_v \frac{\partial R_N}{\partial \sigma} + A_{DH} + HV_c + A_i H_i \right) \quad (8)$$

水蒸気

$$\frac{\partial p^* q_v}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial p^* u q_v/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v q_v/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* q_v \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + q_v DIV + D_{q_v}$$

$$+ \frac{1}{\rho L} \left(BR_w \frac{\partial R_N}{\partial \sigma} + A_{DL} + HV_a + A_i LE_i \right) \quad (9)$$

ここで、 $\dot{Q}$ [$\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$] は単位質量当たりの非断熱加熱率、 ρ は空気の密度、 BR_v/BR_w はボーエン比 ($=0.2$, $BR_v+BR_w=1.0$)、 R_N は樹冠が吸収した短波放射量、 A_{DH} は人工排熱のうち顕熱放散量、 HV_c は空調排熱の顕熱放散量、 A_i は建物外表面面積、 H_i は建物外表面からの単位面積当たりの顕熱放散量、 A_{DL} は人工排熱のうち潜熱放散量、 HV_a は空調排熱のうち潜熱放散量、 LE_i は建物外表面からの単位面積当たりの潜熱放散量である。

2.5. 都市キャノピー内のサブモデル

2.5.1. キヤニオン空間内部の放射

粗度長により建物群・植生群をモデル化する場合、一水平面での熱収支を解く事により表面温度を算出、大気へ放散する顕熱・潜熱フラックスを算出する。一方、建物群・植生群をモデル化する事に因り、都市形状が放射場に与える影響を組み込む事が可能となる。本項では建物群による放射熱伝達のサブモデルについて、短波放射・長波放射に分けて説明する。

2.5.1.1 短波放射

Cloud-radiation スキーム¹⁷⁾を用いる。本スキームでは大気中での散乱やガス吸収、雲による吸収・反射をモデル化し、地表面に到達する全日射量を算出する。しかし都市の幾何形態を反映させ放射解析を行うためには、直達日射と天空日射を個別に取り扱う必要があるため、短波放射の到達する各面に於いて、宇田川²²⁾による直散分離の式を用いて直達日射と天空日射を分離し解析する。

1) 建物屋上面

均等街区を想定しているため、屋上面における短波放射の入射は

直達日射、天空日射の2種類のみが入射するので、各々の建物屋上面における吸収量は以下の式より求めることができる。

$$I_{dra} = (1 - r_r) I_d \sin \theta \quad (10)$$

$$I_{sra} = (1 - r_r) I_{sr} \quad (11)$$

ここで、 I_{dra} は直達日射の吸収量 [W/m²]、 r_r は屋上面のアルベド [-]、 I_d は法線面直達日射量 [W/m²]、 θ は太陽の仰角 [rad]、 I_{sra} は建物屋上面における天空日射吸収量 [W/m²]、 I_{sr} は水平面天空日射量 [W/m²] である。

2) 建物側壁面及び地表面

建物側壁面や地表面に入射した日射の一部は反射し、他の建物の側壁面、地表面へ相互反射する。本解析で用いた放射サブモデルでは1回目の反射だけを考慮し、2回目以降の反射は無視する。

a) 直達日射

直接入射する成分と他の面で反射したのちに入射する成分を計算する。初めに、地表面へ直接入射する日射量については、建物によってできる地表面への陰が地表面全体の面積に占める割合を計算し、影がない場合の直達日射量からこの割合を差し引くことにより求める。この際、陰の総面積 A_{gs} を算出する必要があるが、算出法については既報¹³⁾を参照の事。直達日射の直接入射する成分により地表面が吸収する量 I_{dga} は以下となる。

$$I_{dga} = (1 - r_g) \left(1 - \frac{A_{gs}}{w^2 + 2wb} \right) I_d \sin \theta \quad (12)$$

ここで、 r_g は地表面のアルベドである。

次に、建物側壁面に直接入射する成分については、本来建物がなければ地表面に到達する量が建物によって遮られ陰となる。即ち、地表面の陰の面積に到達する直達日射量が側壁面に直接入射する量となる。従って、直達日射の直接入射する成分により建物側壁面が吸収する量 I_{dwa} は次式になる。

$$I_{dwa} = (1 - r_w) I_d \sin \theta \frac{A_{gs}}{4bh} \quad (13)$$

ここで、 r_w は側壁面のアルベドである。

次に、反射成分については、各面間の形態係数を算出する必要があるが、これに関しても詳細は既報¹³⁾を参照されたい。形態係数を用いると、直達日射が建物側壁や地表面で1回反射して、別の側壁面や地表面に吸収される量はそれぞれ(14)式、(15)式となる。

$$I_{drwa} = (1 - r_w) (F_{ww} r_w I_{dww} + F_{wg} r_g I_{dgw}) \quad (14)$$

$$I_{drga} = (1 - r_g) F_{gw} r_w I_{dww} \quad (15)$$

ここで、 F_{ww} は建物側壁面から臨む他の建物の側壁面の形態係数 [-]、 F_{wg} は建物側壁面から臨む地表面の形態係数 [-]、 F_{gw} は地表面から臨む建物側壁面の形態係数 [-]、 I_{dww} は別の建物の側壁面で反射した後に当該建物の側壁面に入射する直達日射量 [W/m²]、 I_{dgw} は地表面で反射した後に当該建物の側壁面に入射する直達日射量 [W/m²] である。

b) 天空日射

直接入射する成分について、屋上面と同様天空日射に方位依存性がないと仮定して、側壁面での天空率を F_{wsky} とすると、同一計算メッシュ内では街区モデルが高さ一定の均等街区を仮定しているので、

$$F_{wsky} = F_{wg} \quad (16)$$

となる。よって、天空入射の直接入射する成分のうち実際に側壁面に吸収される量 I_{swa} は、以下のように表される。

$$I_{swa} = (1 - r_w) F_{wsky} I_{sr} \quad (17)$$

次に道路面では、地表面での天空率 F_{gsky} を用い、次式を得る。

$$I_{sga} = (1 - r_g) F_{gsky} I_{sr} \quad (18)$$

天空日射の反射成分については直達日射の反射成分の算出法と同様に、側壁面では(19)式、地表面では(20)式になる。

$$I_{srwa} = (1 - r_w) (F_{ww} r_w I_{sww} + F_{wg} r_g I_{sgw}) \quad (19)$$

$$I_{srga} = (1 - r_g) F_{gw} r_w I_{sww} \quad (20)$$

ここで、 I_{sww} は別の建物の側壁面で反射した後に当該建物の側壁面に入射する天空日射量 [W/m²]、 I_{sgw} は地表面で反射した後に当該建物の側壁面に入射する天空日射量 [W/m²] である。

2.5.1.2 長波放射

a) 射出分

建物屋上面、建物側壁面、地表面から射出される長波放射は、それぞれの面における熱収支を計算した結果求める各面の表面温度に依存した赤外線が放射されるものとする。なお、負の符号は表面への吸収を正としているために付加したものである。

$$R_{r\uparrow} = -\varepsilon_r \sigma T_r^4 \quad (21)$$

$$R_{w\uparrow} = -\varepsilon_w \sigma T_w^4 \quad (22)$$

$$R_{g\uparrow} = -\varepsilon_g \sigma T_g^4 \quad (23)$$

ここで、 $R_{\uparrow}$ は各表面から射出する長波放射量の絶対値 [W/m²]、 ε は各面の長波放射率 [-]、 σ はステファンボルツマン定数 (=5.67×10⁻⁸ [W/m²/K⁴])、 T は表面温度 [K]、添字 r は屋上面、 w は側壁面、 g は地表面である。

放射量が決まった後の幾何学的な取り扱いとは建物側壁面や地表面における短波長の拡散日射や反射日射の取り扱いに準ずる。

b) 入射分

建物屋上面では、天空率が1であるので以下より求まる。

$$R_{r\downarrow} = \varepsilon_r R_{sky\downarrow} \quad (24)$$

ここで、 $R_{sky\downarrow}$ は天空からの長波放射量 [W/m²] である。また、建物側壁面や地表面が受ける長波放射量も天空からの長波放射量および建物側壁面ならびに地表面からの長波放射量の和になる。これらの取り扱いも、短波放射の拡散日射、反射日射の取り扱いに準じ、側壁面は(25)式、地表面は(26)式となる。

$$R_{w\downarrow} = \varepsilon_w (F_{wsky} R_{sky\downarrow} + F_{ww} R_{w\uparrow} + F_{wg} R_{g\uparrow}) \quad (25)$$

$$R_{g\downarrow} = \varepsilon_g (F_{gsky} R_{sky\downarrow} + F_{gw} R_{w\uparrow}) \quad (26)$$

2.5.2. 地表面・建物表面での熱収支

前項により算出した放射量を用い、地表面での熱収支を Five-Layer Soil model¹⁸⁾により解く。これは次式で表される地表面の熱収支で残差として現れる地中熱伝導フラックス G_s [W/m²] を境界条件とし、1次元熱収支を解くものである。Five-Layer Soil modelでの地表面パラメータの改良に関しては前報¹⁾を参照。

$$R_n - G_s - H_s - L_v E_s = 0 \quad (27)$$

ここで、 R_n は正味放射量、 H_s は大気への顕熱フラックス、 L_v は蒸発潜熱、 E_s は水蒸気フラックスである。運動量の境界条件は Monin-Obukhov 相似則を用い、 z_0 により地表面粗度を表す。顕熱フラックス H_s も同様に算出され、潜熱フラックス L_v は蒸発効率を用いる β 法により算出される。

建物表面に関しても同様に建物屋上面・壁面での熱収支を計算する。本論文では全ての建物を空気調和衛生工学会中規模事務所ビル²³⁾に準じた RC 造と想定し、屋上面を 4 層（屋外側からモルタル 20mm、コンクリート 150mm、グラスウール成形板 18mm、石膏板 10mm）、壁面を 5 層（コンクリート 150mm、スチレン発泡板 25mm、空気層 25mm、石膏板 9mm、岩綿吸音板 12mm）に分割し熱伝導方程式を解く。建物室内は温度固定（夏期：28℃）とし、貫流熱量を後述する空調排熱算出サブモデルにおいて利用する。

2.6. 植生キャノピー内のサブモデル

2.6.1. 日射の吸収

都市キャノピー内に存在する植生による短波放射の吸収をモデル化する。本来、植生が吸収した短波放射量は植生の葉表面の温度を上昇させ、周辺の気温や湿度の上昇に寄与する。温度場と湿度場への影響は 2.4.3. 項に示す。ここでは植生の熱容量を 0 と仮定し、植生が吸収した短波放射量によって瞬時にそれが存在するメッシュの気温や湿度が上昇することとした。植生により吸収される日射量は Uchijima²⁴⁾の式を用いる。

$$\text{植生の上端において、吸収する短波放射量は次式となる。}$$

$$(1-r_c)(I_d \sin \theta + I_{sr}) \quad (28)$$

ここで、 r_c は植生のアルベドである。

第 n メッシュ上端に入射する短波放射量は植生内での放射吸収による減少分を考慮して、以下で表されるものとモデル化する²⁵⁾。

$$(1-r_c)(I_d \sin \theta + I_{sr}) \exp(-k' a l_n) \quad (29)$$

ここで、 k' は消散係数 [-]、 a は葉面積密度 [m^2/m^3]、 l_n は植生の上端から第 n メッシュの上端までの距離 [m] である。従って、第 n メッシュが吸収する短波放射量は以下となる。

$$(1-r_c)(I_d \sin \theta + I_{sr}) \exp(-k' a l_n) \{1 - \exp(-k' a dz)\} \quad (30)$$

ここで、 dz は第 n メッシュのメッシュ幅 [m] である。(30)式で示した量だけ植生の各メッシュでは短波放射を吸収し、地表面に到達する短波放射量は植生がなかった場合の短波放射量から植生により吸収された分を差し引く。その結果、植生を通過して地表面に到達する短波放射量は次式で表すことができる。

$$(1-r_c)(I_d \sin \theta + I_{sr}) \exp(-k' a l_i) \quad (31)$$

ここで、 l_i は植生の高さ [m] である。

2.6.2. 植生の熱収支

樹木の樹冠高さにおいては(30)式に従って樹冠が日射を吸収すると仮定し、更に葉の熱容量を 0 と仮定することで、樹木が位置するメッシュでの日射吸収熱は植生の蒸散過程と対流熱放散によって当該メッシュの気温や湿度が上昇することになる。植生が短波放射を吸収して顕熱フラックスと潜熱フラックスに変換するときのボーエン比をここでは 0.2 と仮定している。

2.7. 人工排熱

前報に於いて、東京都のエネルギー消費関連資料²⁶⁾データセットを基に、全排熱量を全て顕熱として地表近傍のメッシュの顕熱の輸送方程式に発生項として付加した。本報に於いては 2.5.2 で述べた様に建物の熱伝導方程式を解く事により、原田ら²⁷⁾が提案した空調排熱算出サブモデルを用い、民生部門からの排熱量を推定する。なお、産業・交通部門からの排熱量に関しては東京都のエネルギー消費関連資料より割合を想定し、与える。

2.7.1. 民生部門（空調負荷算出モデルによる空調負荷の計算）

建物からの排熱に関して、1) 躯体からの貫流熱負荷 Q_c 、2) 窓面を透過する日射負荷 Q_s 、3) 外気導入による換気熱負荷 Q_v 、4) 建物の内部熱負荷 Q_H をそれぞれ算出、COP を 3.0 と想定し次式により建物からの排熱量を算出する。

$$Q_{ALL} = (Q_c + Q_s + Q_v + Q_H) \left(1 + \frac{1}{\text{COP}} \right) \quad (32)$$

排熱量は事務所建築・商業施設・戸建て住宅・集合住宅・工場の 5 種類の建物分類について算出し、延べ床面積の割合に応じて重み付けし、各解析メッシュ内の建物全体からの発熱量を算出する。

顕熱・潜熱の割合については、足永ら²⁸⁾による空調システムおよび関連機器から 1 日に発生する顕熱・潜熱の調査を参考とし、事務所建築・商業施設・工場では顕熱 20%・潜熱 80%、戸建住宅・集合住宅では顕熱 100%とした。また、空調排熱排出位置は萩島らによる調査²⁹⁾を参考とし、事務所建築・商業施設・工場では屋上 80%・各階 20%、戸建住宅・集合住宅では各階 100%とした。

サブモデルの詳細については原田ら²⁷⁾を参照の事。

2.7.2. 産業・交通部門

産業部門・交通部門に関してはメソスケールモデルと連成させうる有用なサブモデルが無いため、東京都のエネルギー消費関連資料²⁸⁾を用いて排熱量を与えた。しかしデータセットでは民生部門も含めた排熱量となっているため、既往研究³⁰⁾での推定を用いて民生部門を差し引き、産業部門・交通部門の排熱量を算出、地表近傍のメッシュの顕熱の輸送方程式に発生項として付与した。

2.8. 既存モデルとの差異

序文において述べた様に、MM5 に都市キャノピーモデルを組み込む試みは、Otte *et al.*¹⁰⁾及び Dupont *et al.*¹¹⁾による DA-SM2-U、更に Taha¹²⁾により DA-SM2-U から改良された Urbanized MM5 (uMM5) が発表されている。本節では、この一連のモデルと本論文で提案するモデルの差異について述べる。

本モデルと DA-SM2-U・uMM5 とを比較する際に言及するべきは、その目的の違いと考える。DA-SM2-U・uMM5 は都市の影響がメソスケール気象場に及ぼす影響を組み込むため、MM5 に都市をモデル化し組み込んでいる。対して我々は、メソスケールモデルの解析結果より直接的に都市居住者の温熱環境を評価する事を目指し、メソスケールモデルに都市の効果を組み込む事を行ってきた。この様な方針の差異が、本モデルと DA-SM2-U・uMM5 との差異として現れているものと考ええる。

詳細なパラメタリゼーションの差異についてはここでは省略するが、我々のモデルで特徴的な点として、キャノピー層内部のサブモ

デルの高精度化を挙げる事が出来る。例えば放射に関しては、DA-SM2-U ではキャノピー内部の正味放射量を Uchijima²⁴⁾の式のみで簡易に求めている。また uMM5 では、30° 毎に集計した各メッシュ内の道路総延長によってキャニオンの方位を決定し、Masson⁷⁾の提案した実効アルベド (effective albedo) の定式を用いるが、これは2次元キャニオンを想定して定式化されたものである。対して我々のモデルでは既報¹³⁾において提案した様に、キャニオン空間を3次元としてモデル化し、放射の遮蔽や日陰の効果を個別に取り扱うサブモデルを用いている。またキャニオン空間内部の各面で放射要素を個別に取り扱う事により建物屋上面及び側壁面でのエネルギー収支を計算する事が可能となり、更に建物モデルの熱伝導計算を組み込む事により、原田ら²⁷⁾の提案した空調排熱算出サブモデルを用い民生部門の人工排熱量を同時に計算可能としている。

我々のモデルでは、キャノピー層内部のサブモデルの高精度化を目指し改良を行ってきたが、しかし、個々のサブモデルの精度を高める事が直ちに総体としての解析結果の精度向上に繋がるとは限らない。また、各種パラメータ設定が煩雑になり、実現象に適合する様チューニングする事が容易ではない。反対に、簡易なモデルを用いた方が使用するパラメータの数が少なく、実測値との比較によるパラメータのチューニングが容易であると言う点は大きなメリットと言える。我々のモデルは現時点では実測値等の比較は不十分であり、各種パラメータのチューニングについても不十分である点是否めない。これらは今後、実市街地での実測値と比較する事により精度を検証し、更に精度向上を図る予定である。

3. 解析概要

3.1. 解析ケース

本論文の主目的である都市キャノピーモデル組み込みの効果を検証するため、粗度長により都市及び植生をモデル化する従来型の解析も併せて行う。以下、本論文で提案する都市キャノピーモデルを組み込んだ MM5 での解析を Case UC、従来型の MM5 での解析を Case z_0 と呼称する。ただし、従来型の MM5 はオリジナルのモデルではなく、前報¹⁾に於いて地表面パラメータを改良し人工排熱の影響を組み込んだモデルである。

3.2. 仕様モデル・スキーム

放射スキームは、Dudhia による Cloud-radiation スキーム¹⁷⁾を用いた。このスキームでは、モデル化された雲の有無が長波・短波放射に及ぼす影響を解析することが可能である。放射計算の時間間隔は、10分とした。積雲パラメタリゼーションについては、最も粗い Domain1 についてのみ Grell スキーム³¹⁾を用い、Domain2 及び 3 についてはサブグリッドスケールの積雲を取り扱わず、グリッドスケールの積雲を陽に解いている。水蒸気スキームは、Dudhia による Simple ice スキーム¹⁷⁾を用いた。また、各ケースの差異を検証するため、4次元同化は行っていない。

3.3. 都市及び植生の形態の再現

平均建物幅は、東京 23 区に関しては、東京都 GIS データ³²⁾から得られる各解析メッシュ内に存する全建物の建築面積の合計を建物棟数で除する事で1棟辺りの平均建築面積を8算出し、その平方を平均建物幅 (b) とする。次に1街区の面積 ($(w+b)^2$ で表される)

を、メッシュ内の建物用地以外の陸地面積を建物棟数で除することにより求め、最終的に平均建物間隔 w を算出する。なお、23 区以外については平均建物幅 b を 7m と仮定し、建物用地に対して建蔽率が 50% となるように建物棟数を求め、平均建物間隔 w を算出する。

建物の分類に関しては、東京都 GIS データでは 24 種類に分類されており、民生部門の人工排熱量算出のため、事務所建築・商業施設・戸建て住宅・集合住宅・工場の 5 種類に再分類した。それぞれの用途に関して延べ床面積の比率を算出し、重み付けに用いる。

平均建物高さ及び樹木高さは、東京 23 区についてはリモートセンシングデータを利用した。地物の高さ情報を得るため、航空機搭載レーザスキャナにより解像度約 2m で計測された DSM (Digital Surface Model) と DEM (Digital Elevation Model) の 2 データ³³⁾を 10m メッシュに集計したデータを用いた。また、DSM と DEM の差が 2m 以上のメッシュのみを地物と判定し、それ以外は地面とした。これらのリモートセンシングデータでは地物表面の高さを計測しているため、建物と樹木とが区分されておらず、それらを分離する必要がある。そのため、ASTER 画像から NDVI (植生指数; Normalized Difference Vegetation Index) を算出した。NDVI は植生が存在する箇所では高い値を示すため、それにより建物高さと植生高さに分離し、最終的にメソスケールモデルの入力データとして用いるために 3 次メッシュデータで建物高さ及び樹木高さデータを整備した。詳細については文献 34 参照。23 区以外については平均建物高さ h を一律 6m、樹木高さを 5m としている。なお、樹木の形状は考慮していない。即ち、樹冠と樹幹で特性の差異は検討しておらず、樹木頂点から地表まで同一のモデル化を行っている。

3.4. 解析領域

図 2 に示す Domain1 (東西方向 50 メッシュ×南北方向 60 メッシュ、格子間隔 9km)、Domain2 (78×87、3km)、Domain3 (99×120、1km) に対し 2 方向ネスティングを行って解析した。鉛直方向のメッシュ分割は全領域共通で、不等間隔に 43 メッシュ (Case UC) 及び 29 メッシュ (Case z_0) に分割している。鉛直座標は σ 座標を用いており、地表第一メッシュは約 2m (Case UC) 及び約 36m (Case z_0)、解析領域上端は約 14km である。

図 2 解析領域

3.5. 地表面パラメータ設定

前報¹⁾に従い、3 次メッシュ (空間解像度約 1km) により整備されている国土数値情報土地利用メッシュ (平成 9 年) の 11 分類土地利用データを用い、メッシュ内の各土地利用の割合に応じて面積加

重平均して地表面パラメータを設定した。夏季を対象とした各種パラメータを表 1 に示す。都市キャノピーモデルを組み込むため、「森林」・「建物用地」・「幹線交通用地」・「その他の用地」では粗度長の値を変更している。

標高については、USGS (U.S. Geological Survey) による空間解像度 30" のデータセットを用いた。

表 1 地表面パラメータ (夏期)

土地利用	アルベド [%]	蒸発効率 [%]	放射率 [%]	粗度長 [cm]	熱慣性 [$\text{cal cm}^{-2} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1/2}$]
田	18	50	98.5	10	0.04
その他の農用地	17	30	98.5	15	0.04
森林	13	30	97	10 (UC) 50 (z_0)	0.04
荒地	25	2	90	1	0.02
建物用地 幹線交通用地 その他の用地	15	10	88	10 (UC) 80 (z_0)	0.03
河川地及び湖沼 海水域	8	100	98	0.01	0.06
海浜	19	15	92	12	0.03
ゴルフ場	19	15	96	12	0.03

3.6. 境界条件・初期条件

側面境界条件は、Domain1 に対しては緩和境界条件を用い、Domain2 及び 3 ではそれぞれ Mother Domain からのネステイングを行った。底面境界条件は、NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 最終解析データから表面温度、海面温度を用いた。上面境界条件は、放射境界条件を用いた。

初期条件は、NCEP 最終解析データを用いて初期場を作成した。解析は、東京首都圏で晴天日が連続した 2005 年 8 月 4 日 9:00 から 6 日 0:00 までの 39 時間の解析を行った。

3.7. 人工排熱条件

Case UC では、2.7 節で述べた手法により民生部門は外気条件に応じて排熱量を逐次計算し、交通・産業部門はデータセットより民生部門と想定した排熱量を差し引き、与える。Case z_0 では全ての排熱量をデータセットより与える。

4. 解析結果

4.1. 気温・風速ベクトル水平分布及び地表面温度分布

解析結果より、Domain3 の 2005 年 8 月 5 日 12:00 の気温の水平分布を図 3 に、風速ベクトルを図 4 に示す。気温は地上 2m、風速は地上 10m の値を示すが、これは地上第 1 メッシュの中心点と地表面の値を用いて補間した値である。同時刻の地表面温度を図 5 に示す。Case UC は Case z_0 に比し、全体的に地表付近の気温が低下する傾向にある。これらは両 Case での各面のエネルギー収支を比較する事により、その差異が顕著になる。図 6 に大手町を含むメッシュにおける、Case z_0 の地表面、Case UC の地表面・建物壁面・建物屋上面の各面でのエネルギー収支を示す。図 6 a) 及び b) の比較から、都市キャノピーモデルを組み込む事によって建物により日射が遮蔽されることにより、また植生がある部分では日射が吸収されることにより、地表面に到達する日射量が減少し地表面温度の上昇が抑制される事が推測される。一方 Case z_0 では建物の効果を地表面に含めて地表面熱収支を解いており、厳密な意味で地表面温度を予測しているのではなく地表面温度に建物表面温度を加える形で再現されているため、温度が高くなったものと考えられる。

両 Case 共に、千葉県東部、特に房総半島の太平洋側の地域の低温域が顕著であり、太平洋側から吹き込む海風を過大評価している可能性があるが、解析での風向・風速の全体的な傾向としては、Case z_0 ・Case UC 間で大きな差異は見られなかった。即ち、日中は相模湾・東京湾・太平洋から海風が吹き込み、それによって海上の冷涼な空気が流入する事により沿岸部の気温上昇が抑制される結果が示されている。

4.2. AMeDAS 観測値との比較による誤差評価

前報同様、Domain3 内に位置する AMeDAS³⁵⁾観測点 26 点 (観測点の位置については図 2 参照) での気温解析結果の平均誤差 (Mean Error; ME) と 2 乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error; RMSE) を表 2 に示す。解析値は前節の気温分布と同様に高さ 2m に補間された値を用い、観測値はそれぞれの観測点の高さで得られた値をそのまま用いている。なお、前報に於ける Case4 (地表面パラメータを改良し、人工排熱を組み込んだケース) と本報に於ける Case z_0 は同一のモデルを用いているが、放射解析の時間間隔を 30 分から 10 分に変更しているため、誤差の値が異なっている。なお、本論文では AMeDAS 観測値との比較においては各観測点の周辺環境については考慮せず、誤差評価に関しては解析領域 Domain3 内に位置する 26 点の観測点全てに対して行った。しかし、AMeDAS 観測点が必ずしも解析領域を代表する観測点ではない事に注意を要する。以上を鑑み、誤差評価に用いる観測点の選別に関しては今後検討を行う。

各観測点に於いて誤差の性状は異なるが、全 26 点で 1 日を通した結果を比較すると、都市キャノピーモデルを組み込んだ Case UC は Case z_0 に対し、ME・RMSE 共に僅かではあるが誤差が減少している。しかしこれが、キャノピーモデル組み込みによる都市キャノピー層からのフラックスの予測精度の向上に起因するのか、地表近傍を詳細に解像したため、2m 高さでの補間値が変化したためなのか、判別出来ない。次節ではプロファイルの比較を行い、両 Case の差異を検証する。

4.3. 各種物理量の鉛直プロファイル

4.3.1. 高層気象観測と解析値の比較

図 7 に、つくば市館野での 09:00 のゾンデ観測³⁶⁾より作成した温位・風速・水蒸気混合比のプロファイルを示す。同様に図 8 に 21:00 のプロファイルを示す。なお、観測値としては気圧・気温・相対湿度が公開されており、それらを用いて温位・混合比に換算している。またグラフの縦軸は、解析値は海拔により、観測値はジオポテンシャル高度^{注 2)}によりプロットしている。

図 7 及び 8 では解析領域上端までを表示しているが、このレンジで比較すると、21:00 では風速プロファイルで誤差が大きくなっているものの、全体として良い対応を示している。特に温位プロファイルは非常に良く対応していると言える。しかし Case z_0 と Case UC の差異は極僅かであり、そもそもの MM5 での解析精度が優れていたものであり、都市キャノピーモデルを組み込んだ事に因る解析精度の向上に関して言及する事は困難である。また、館野周辺は建物群による影響が小さいため、両 Case での差異が小さかったのだとも考えられる。

図3 気温水平分布 (2005年8月5日12:00、地上2m)

図4 風速ベクトル水平分布 (2005年8月5日12:00、地上10m)

図5 地表面温度分布 (2005年8月5日12:00)

図6 各面エネルギー収支 (2005年8月5日、大手町)

表2 ME・RMSE 比較

	ME		RMSE	
	Case z_0	Case UC	Case z_0	Case UC
東京	-0.023	0.145	0.604	0.482
青梅	0.171	0.082	1.027	1.323
練馬	-0.171	-0.425	0.967	0.974
八王子	0.123	0.117	1.299	1.069
府中	0.289	0.316	0.885	0.946
新木場	-0.255	-0.170	1.894	1.732
羽田	0.174	0.174	1.145	0.986
久喜	0.127	-0.098	1.636	1.732
鳩山	0.769	0.482	1.730	0.986
さいたま	0.138	-0.284	1.384	1.421
越谷	0.180	0.091	1.728	1.808
所沢	-0.128	-0.169	1.442	1.120
我孫子	0.445	0.257	1.624	1.668
船橋	1.019	0.924	1.651	1.606
佐倉	0.916	0.857	2.033	2.005
千葉	-0.980	-0.425	2.609	1.964
茂原	0.449	0.482	1.599	1.722
木更津	0.372	0.610	1.544	1.814
牛久	0.724	0.500	2.349	2.390
成田	2.097	1.552	2.435	2.238
海老名	0.263	0.282	1.428	1.602
横浜	-0.128	0.178	1.259	1.272
辻堂	0.910	0.761	1.207	1.115
小田原	1.209	1.490	1.665	2.007
つくば(館野)	1.775	1.405	2.259	2.178
龍ヶ崎	0.936	0.685	2.059	1.953
26点全体	0.439	0.378	1.667	1.634

図7 鉛直プロファイル (2005年8月5日09:00、館野)

図8 鉛直プロファイル (2005年8月5日21:00、館野)

図9 鉛直プロファイル

(2005年8月5日12:00、大手町、地上3,000m)

図10 鉛直プロファイル

(2005年8月5日12:00、大手町、地上300m)

4.3.2. 大手町上空でのプロファイル

図 9 及び 10 に大手町を含む 1km メッシュでの温位、風速及び乱流エネルギーの鉛直プロファイルを示す。図 9 は境界層を含む様、地上 3,000m 迄、図 10 は地表近傍に着目するため地上 300m 迄としている。プロットは解析値のみで、地表付近でのデータの内挿は行っていない。時刻は 2005 年 8 月 5 日 12:00 である。

各図より、両 Case 共に接地層高さが約 50m、境界層高さが約 1400m、移行層高さが 1750m と見積もられる。Case α では平均建物高さ約 17m であるこの領域の都市キャノピー層内部の再現が出来ていないのに対し、Case UC では都市キャノピー層内部のプロファイルを再現する事が可能であり、これは特に風速プロファイルにおいて建物群による風速低減の効果が顕著に見られる。しかし、建物群を平均建物高さのみで決定しているため、Case UC では都市キャノピーモデルの有無が切り替わる部分で、温位に局所的な逆勾配が生じている。これは、建物屋上面からの顕熱フラックスにより大気が加熱されるため、また屋上面には日陰が出来ないと仮定しているため顕熱フラックスの値も大きく、建物屋上面が位置するメッシュに於いて急激な温位の上昇が生じているためである。実際の街区は様々な高さの建物が混在しているため、このような温位プロファイルは実現象とはそぐわないと考えられる。都市キャノピー層内外を連続的に接続する様なモデルの改良が必要である事が示唆される。

都市キャノピーモデルが上空のプロファイルを精密に予測し、メソスケールモデルの境界条件として十分に機能するかは、都市キャノピーモデルが都市上空のフラックスを正しく予測し得るかどうか強く依存している。現在の所、都市上空のフラックスについては定点で観測した例はあるが、都市全域のフラックスを観測した例は殆ど無く、都市キャノピーモデルのフラックス予測精度を検証する実測データが不足している。今後は、このような実測データの整備を含め、都市キャノピーモデルの精度を高めていく予定である。

5. 結論

本論文に於いては、従来のメソスケールモデルが内包する 3 点の問題を解決すべく、世界中で広く用いられ実績のあるメソスケールモデル MM5 に都市キャノピーモデルを組み込み、その結果を示した。以下に 3 点の問題に対してまとめる。

- 1) 東京 23 区については GIS データとリモートセンシングデータを用いて都市の形状を再現し、都市キャノピーモデルの入力データとして用いた。しかし、その他の地域についてはデータ整備が十分とは言えず、既存のデータから都市形状を推測するモデルを検討する必要がある。
- 2) 本論文では都市上空の物理場の精度検証は、館野での高層気象観測データとの比較しか行っておらず、不十分と言わざるを得ない。今後、都市上空でのフラックス観測データを用いた検証を行う予定である。
- 3) Multi-Layer 都市キャノピーモデルを組み込む事により、地表近傍を約 2m の解像度で分割し、補間を行うことなく人間の居住域での温熱環境を予測する事が可能となった。

今後は 2) に関して、本論文において提案した都市キャノピーモデルを組み込んだ MM5 の解析精度の検証を行う。本論文の解析結果の比較のみでは、都市キャノピーモデルの有無による解析結果の

差異が明確ではなく、また比較に用いた物理量も限定されており、モデルの検証として不十分である点は否めない。今後は熱フラックス等の乱流統計量について、実市街地での実測値等との比較を行い、次報として取り取り纏めるべく検討を行っている。

本報及び前報で用いたモデルのソースコードを [website \(http://venus.iis.u-tokyo.ac.jp/field/mesoscale/mm5/\)](http://venus.iis.u-tokyo.ac.jp/field/mesoscale/mm5/) にて公開する予定である。当該分野での研究の発展の一助となる事を望む。

参考文献

- 1) 川本陽一, 大岡龍三: 地表面パラメータ設定の改良、及び人工排熱影響の組み込み MM5 を用いた都市気候解析モデルの構築 (その 1), 日本建築学会環境系論文集, No.631, pp.1125-1132, 2008.9
- 2) Grell, G.A., Dudhia, J. and Stauffer, D.R.: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model(MM5), NCAR TECHNICAL NOTE, TN-398+STR, 1995.6
- 3) 持田灯, 村上周三, 金相璠, 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) 概念設計と Prototype System の構成, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.1099-1100, 2000.9
- 4) 原山和也, 大岡龍三, 村上周三, 吉田伸治, 瀬戸島政博, 近藤裕昭: 都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルによる関東地方の都市気候解析, 日本建築学会環境系論文集, No.592, pp.75-82, 2005.6
- 5) Ashie, Y., Ca, V.T., and Asaeda, T.: Building canopy model for the analysis of urban climate, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.81, pp.237-247, 1999.5
- 6) Ca, V.T., Asaeda, T. and Ashie, Y.: Development of a numerical model for the evaluation of the urban thermal environment, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.81, pp.181-196, 1999.5
- 7) Masson, V.: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, Boundary-Layer Meteorology, Vol.94, pp.357-397, 2000.3
- 8) Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F.: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models, Boundary-Layer Meteorology, Vol.101, pp.329-358, 2001.12
- 9) Martilli, A., Clappier, A. and Rotach, M.T.: An urban surface exchange parameterization for mesoscale models, Boundary-Layer Meteorology, Vol.104, pp.261-304, 2002.8
- 10) Otte, T.L. and Lacser, A.: Implementation of an Urban Canopy Parameterization in a Mesoscale Meteorological Model, Journal of Applied Meteorology, Vol.43, pp.1648-1665, 2004.11
- 11) Dupont, S., Otte, T.L. and Ching, J.K.S.: Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model, Boundary-Layer Meteorology, Vol.113, pp.111-158, 2004.10
- 12) Taha, H.: Episodic Performance and Sensitivity of the Urbanized MM5 (uMM5) to Perturbations in Surface Properties in Houston Texas, Boundary-Layer Meteorology, Vol.127, pp.193-218, 2008.5
- 13) 川本陽一, 大岡龍三: メソスケールモデルに組み込んだ都市キャノピーモデルにおける放射解析手法の改良, 日本建築学会環境系論文集, No.609, pp.63-70, 2006.11
- 14) 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, 33(3), pp.179-192, 1998
- 15) Janjic, Z. I.: The Step-Mountain Coordinate: Physical Package, Monthly Weather Review, Vol.118, pp.1429-1443, 1990.7
- 16) Janjic, Z. I.: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes, Monthly Weather Review, Vol.112, pp.927-945, 1994.5
- 17) Dudhia, J.: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, Journal of the Atmospheric Sciences, vol.46, pp.3077-3107, 1989.10

- 18) Dudhia, J.: A multi-layer soil temperature model for MM5, The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, pp.49-50, 1996
- 19) Mellor, G.L., and Yamada, T.: Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol.20, No.4, pp.851-875, 1982.11
- 20) Wilson, N.R., and Shaw, R.H.: A Higher Order Closure Model for Canopy Flow, Journal of Applied Meteorology, Vol.16, pp.1197-1205, 1977.11
- 21) Yamada, T.: A Numerical Model Study of Turbulent Airflow in and Above a Forest Canopy, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.60, pp.439-454, 1982.2
- 22) 宇田川光弘, 木村健一: 水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, No.267, pp.83-90, 1978.5
- 23) 社団法人・空気調和・衛生工学会, 設計用最大熱負荷計算法, 1994
- 24) Uchijima, Z.: On Characteristics of Heat Balance of Water Layer under Paddy Plant Cover, Bull. Nat. Inst. Agr. Sci., Vol. A, pp.243-263, 1961
- 25) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三: 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会環境系論文集, No.536, pp.87-94, 2000.10
- 26) 資源環境技術総合研究所 環境影響予測部, 大都市における夏季高温化対策技術の評価手法の開発, 研究資料 97-1, 1997.3
- 27) 原田雄介, 村上周三, 大岡龍三, 原山和也, 佐藤大樹, 川本陽一: 空調排熱計算を連成させた局地気候モデルによる都市気候解析 空調排熱モデルの開発とヒートアイランド緩和方策の効果に対する検討, 日本建築学会環境系論文集, No.597, pp.65-72, 2005.11
- 28) 足永靖信, 田中稔, 山亨, 田口明美: 冷熱源機器の導入割合を考慮した空調システムおよび関連機器の地域排熱量に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.86, pp.77-85, 2002.7
- 29) 萩島理, 谷本潤, 片山忠久, 大原健志: 改良・建築・都市・土壌連成系モデル (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, 日本建築学会計画系論文集, No.550, pp.79-86, 2001.12
- 30) 吉田伸治, 大岡龍三, 村上周三, 原山和也: CFD 解析による人工排熱が都市のヒートアイランドに及ぼす影響の検討, 第18回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp.499-502, 2002.1
- 31) Grell, G. A.: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations, Monthly Weather Review, vol.121, pp.764-787, 1993.3
- 32) 東京都都市計画局総合計画部, 東京都都市計画地理情報システム、平成13-14年度土地利用現況および建物用途現況、2003
- 33) 瀬戸島政博, 赤松幸生, 船橋学, 今井靖晃, 天野正博: 航空機レーザスキャナによる森林域の計測とその適用性, 写真測量とリモートセンシング, Vol.41, No.2, pp.15-26, 2002
- 34) 小川華奈, 遠藤貴宏, 川本陽一, 大岡龍三, 安岡善文: リモートセンシングデータとモデルの結合によるヒートアイランド現象の評価, 生産研究, Vol.59, pp.325-323, 2007.5
- 35) <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (参照 2008 年 9 月 20 日)
- 36) <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/upper/index.php> (参照 2008 年 9 月 20 日)

注

注1) 植生キャノピーモデルにおいて葉面積密度に相当する建物群の面積密

度 a は $\frac{4b}{(b+w)^2}$ [m^2/m^3] とする。これは、1 区画の面積が $(b+w)^2$ [m^2]、

建物 1 辺の長さが b [m] より、この領域内にある全建物の周長は $4b$ [m]

となる。従って、建物群の面積密度は $\frac{4bh}{(b+w)^2 h}$ [m^2/m^3]、つまり

$\frac{4b}{(b+w)^2}$ [m^2/m^3] ($[1/\text{m}]$) となる。

注2) ジオポテンシャル高度 Z は次式により定義される。

$$\phi = \int g dz = gz \quad (33)$$

$$Z = \frac{\phi(z)}{g_0} \quad (34)$$

ここで、 ϕ はジオポテンシャル、 z は幾何学的高度、 g_0 は標準重力加速度である。ジオポテンシャル高度は対流圏や成層圏下部に於いては幾何学的高度とほぼ等しいため、ここではジオポテンシャル高度を用いてプロットする。

(2008年10月3日原稿受理, 2009年5月1日採用決定)