

## 都市気候モデリング研究の取り組みと今後の課題

日下 博 幸\*

### 1. はじめに

都市気候は、(1) 緑地の減少、(2) 建物の増加、(3) 人間活動の活発化などに起因する様々な都市効果の重ね合わせによって形成される都市特有の気候である。ヒートアイランドは都市気候の中で最も顕著な現象であり、近年社会的な関心を集めている。1960年代までは、観測データの解析からヒートアイランドのメカニズムを定性的に説明する論文がほとんどであったが、その後、数値モデルを用いて定量的に説明する論文も少しずつ発表されるようになった。現在、数値モデル研究はヒートアイランドの原因解明のための重要な分野の一つと考えられている（例えば、菅原ほか 2006）。本稿は、このような状況の中で開催された第26回メソ気象研究会（中西ほか 2006）の講演をベースに、新たな視点を加えて、都市気象モデリング研究のこれまでの取り組みと今後の課題をまとめたものである。

### 2. 熱収支モデル

数値モデルによって都市気象を再現するためには、冒頭で述べたような様々な都市効果をモデルに反映させる必要がある。モデル内での取り扱い方は、そのモデルの取り扱うスケール、とりわけモデルの解像度に大きく依存する。都市気象モデルには、都市の全体規模の気象を扱うモデル、街路内での平均的な温度や風を扱うモデル、ビル周りの風を扱うモデルがある（第1表）。数値モデルの利用者は、個々のモデルで計算される物理量の意味をよく理解した上で、各々の目的

や対象スケールに適切と思われるモデルを使用する必要がある（日下 2004）。

都市の地表面をメソスケールの視点で見た場合、式(1)で記述される熱収支式の各項を計算する際に使われる地表面パラメータを都市用に設定することで、都市の効果をモデル内で表現することができる。

$$\begin{aligned} Sn + Ln &= S(1 - \alpha) + \varepsilon(L - \sigma T_s^4) \\ &= H + LE + G \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $Sn$ 、 $Ln$ 、 $H$ 、 $LE$ 、 $G$ はそれぞれ、地面が受け取る正味の短波放射量、長波放射量、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量である。 $S$ は日射量、 $L$ は下向き長波放射量、 $T_s$ は地表面温度、 $\alpha$ はアルベド、 $\varepsilon$ は射出率、 $\sigma$ はステファン・ボルツマン定数である。顕熱および潜熱フラックスは、例えばバルク法とベータ法を組み合わせる用いた場合、以下のように計算される。

$$H = \rho c_p C_H U (T_s - T) \quad (2)$$

$$LE = \rho l \beta C_H U (q_s - q) \quad (3)$$

第1表 都市気候モデル（日下 2004より）。

種類	対象スケール	水平解像度	鉛直解像度	モデルで計算される地上気温
メソスケールモデル	都市全体 (10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup> m)	10 <sup>3</sup> m	10 <sup>1</sup> ~10 <sup>2</sup> m	接地層の平均気温
キャノピーモデル	街区 (10 <sup>2</sup> ~10 <sup>3</sup> m)	10 <sup>1</sup> ~10 <sup>2</sup> m	10 <sup>0</sup> m	キャノピー層内の気温
CFDモデル	ビル周り (10 <sup>1</sup> m)	10 <sup>-1</sup> m	10 <sup>-1</sup> m	建物や道路近傍の気温

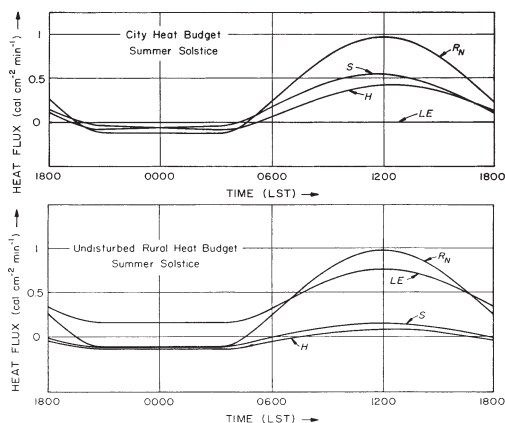
\* 筑波大学・計算科学研究センター。

kusaka@ccs.tsukuba.ac.jp

—2007年7月3日受領—

—2008年2月12日受理—

ここで、 $U$ ,  $T$ ,  $q$  はそれぞれ大気モデルの最下層の風速、気温、比湿で、 $q_s$  は  $T_s$  に対する飽和比湿である。 $C_H$  はパルク輸送係数で、地上風の風速、大気の安定度、粗度などの関数である (近藤 1994)。 $\beta$  は蒸発効率であり、地面が湿っているほど 1 に近い値をとり乾いているほど 0 に近い値をとる (近藤 1994)。地中熱流量は熱容量と熱伝導係数の土壌パラメータを持つ熱伝導方程式を解くことによって計算される。これらの式から、建物の増加を表すためには粗度長を大きくしアルベドを小さくする、緑地の減少を表すには蒸発効率を小さくし熱容量と熱伝導率を大きくすればよいことがわかる。また、人工排熱項を追加することにより、人間活動の影響を表現することもできる。このような方法で都市を表現する熱収支モデルは平板都市モデル (あるいは単に平板モデル) と呼ばれており、ヒートアイランドの数値シミュレーションに対して広く使われてきた。モデル研究の先駆けとなった Myrup (1969, 1970) もこれと類似の手法を用いていた。第 1 図は Myrup (1969) によって計算された都市と郊外の地表面熱収支である。都市では顕熱フラックスが多く、潜熱フラックスが小さいことがわかる。Myrup (1969) は、風速、アルベド、粗度、蒸発量の感度実験を行い、都市の高温化の要因も調べている。彼は、地表面温度と蒸発面積 (緑地率) の関係を調べ、蒸発面積が少ないほど地表面温度が高くなることを明らかにした。



第 1 図 熱収支モデルによって計算された都市と郊外の地表面熱収支の日変化。RN, H, LE, S はそれぞれ正味放射量、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量 ( $1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} = 697.8 \text{ Wm}^{-2}$ )。Myrup (1969) より。

Goward (1981) もまた平板モデルを用いて、熱慣性 (熱容量と熱伝導係数の関数) の増加が夜間の都市地表面の高温維持に対して重要な役割を果たしていることを確認した。ただし、熱慣性の増加だけでは観測事実を説明できないことから、天空率の減少による放射冷却の阻害もまた重要な要因である可能性を指摘している。その後、Johnson *et al.* (1991) や Oke *et al.* (1991) は、都市のストリートキャニオン内の熱収支を計算するキャニオンモデル (天空率のパラメータを持つモデル) を作成し、熱慣性の増加だけではなく天空率の減少もまた夜間の道路面温度の冷却率を緩和させることを示した。このように off-line モデルとしての平板モデルあるいはキャニオンモデルは、そのわかりやすさと使いやすさからその後もヒートアイランドのメカニズムの研究などに利用されている (例えば、Outcalt 1972a, b; Tapper *et al.* 1981; Grimmond *et al.* 1991; 菅原・近藤 1995; Mills 1997; Grimmond and Oke 1999; Arnfield 2000; Sugawara *et al.* 2001)。

地表面と大気とのフィードバックを考慮したモデルによるヒートアイランドシミュレーションの研究は Atwater (1972) によってはじめられた。Atwater (1972) は平板モデルと鉛直 1 次元大気モデルを結合させたモデルを用いて、都市と郊外の地上気温の日変化を計算した。その結果、定量的には従来の観測結果と必ずしも一致しないものの、都市と郊外の気温差は夜間において最も顕著に見られるというヒートアイランドの特徴を確認した。さらには、ヒートアイランドに対する人工排熱、大気汚染物質、粗度長、蒸発効率などの感度実験を行い、日中のヒートアイランドの形成に対しては蒸発効率の影響が、夜間のヒートアイランドに対しては人工排熱の影響が大きなことを明らかにした。McElroy (1973) は Estoque (1961) のモデルを拡張し、地表面と大気とのフィードバックを考慮した鉛直 1 次元の都市境界層のシミュレーションを行った。Myrup (1969, 1970) や Atwater (1972) の研究は、現在広く行われているメソスケールモデルを用いたシミュレーション研究に対する最初の試金石となっている。

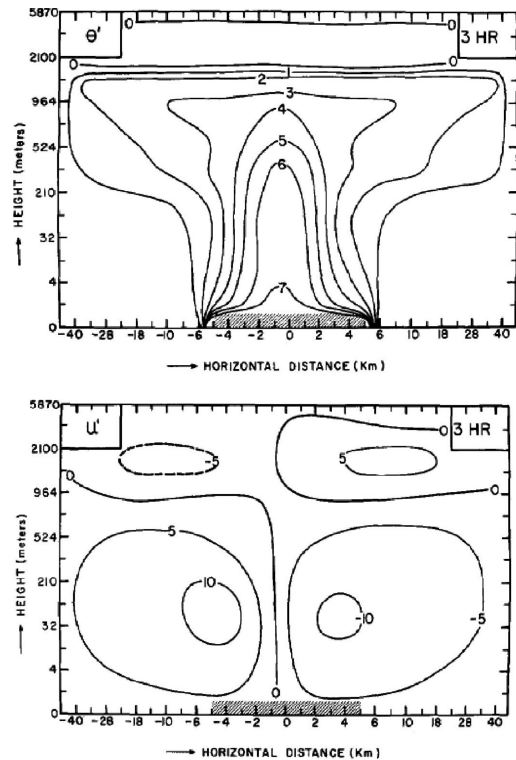
### 3. ヒートアイランド循環モデル

ヒートアイランド循環を再現する力学モデルは、当初、線形論を補完するものとして開発された (例えば、Vukovich 1971, 1973; Olfe and Lee 1971;

Kimura *et al.* 1977). Kimura *et al.* (1977) は2次元過渡方程式モデルを用いて、ヒートアイランド循環とクロスオーバー現象（境界層上部付近で都市のほうが郊外よりも低温になる現象）を再現し、クロスオーバーがヒートアイランド循環に伴うオーバーシュートによって形成されることを示した。当時は2次元計算が主流であったため、このように過渡方程式のモデルもしばしば使われた（例えば、Bornstein 1975）。一方で、海陸風モデルをベースにしたヒートアイランド循環モデルの開発も進められていた。Estoque and Bhumralkar (1969) は、Estoque (1961, 1963) によって開発された非線形2次元静力学モデルを改良し、ヒートアイランド循環のシミュレーションを行った（第2図）。また、ヒートアイランドや循環に及ぼす一般風の影響を調査した。Delage and Taylor (1970) もまた同様のシミュレーションを行った。しかしながら、彼らのシミュレーションでは、ヒートアイランド現象は境界条件として与えられていた（地表面温度が与えられていた）。

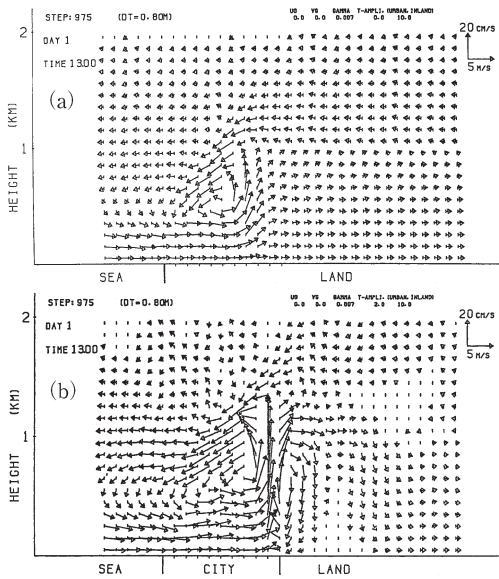
Yu and Wagner (1975) や Sawai (1978) は、現在のメソモデルに近いモデル、風速の南北成分 ( $v$ ) の予報方程式と地表面熱収支式を持ち、コリオリ力を考慮し、鉛直拡散係数の取り扱いをより高度化したモデルを用いて様々な数値実験を行い、ヒートアイランド循環が、大気安定度、一般風の強さ、都市と郊外の地表面状態、人工排熱などの違いに大きな影響を受けることを明らかにした。ただし、彼らのモデルも含めて1970年代のモデルのほとんどは定常状態の再現を目的としていた。その後、Schultz and Warner (1982) は現在広く使われているメソスケールモデルMM5の前身であるMM4の2次元版を用いて、日変化を考慮した現実的なシミュレーションを行った。2次元モデルによる理想化シミュレーションは、現象のメカニズムを理解しやすい、理論的な研究に適しているという長所があるため、基礎研究を中心に現在でもしばしば実施されている (Martilli 2002; Ohashi and Kida 2002a; Kusaka and Kimura 2004a, b; Niino *et al.* 2006)。Martilli (2002) や Kusaka and Kimura (2004b) は、後に述べるように2次元モデルを用いてヒートアイランドの要因解明を行っており、Niino *et al.* (2006) はヒートアイランド循環に関する理論的な考察を行っている。

ある程度の水平スケールをもった都市が沿岸部に存在する場合、ヒートアイランド現象と海陸風の間



第2図 2次元のヒートアイランド循環シミュレーションの結果。計算領域の中央に都市を置いた場合。上図は温度 [K] (偏差)、下図は風速の  $U$  成分 [m/s] (偏差)。Estoque and Bhumralkar (1969) より。

相互作用が生じる。ヒートアイランド現象と海風循環の相互作用に関する数値シミュレーションはそれほど多くはないものの、古くから国内外で存在する。例えば、米国シカゴのヒートアイランドとミシガン湖からの湖風循環の相互作用 (Patrinos and Kistler 1977)、ヒートアイランド循環と海風循環の相互作用 (Savijarvi 1985)、東京のヒートアイランドと海風の相互作用 (Takano 1977) などがある。Yoshikado (1992) は2次元の静力学モデルを用いて関東平野に見立てた平坦地形上で発達する夏季晴天日の海風循環のシミュレーションを行い、都市の有無によって海風前線の様相が大きく異なる可能性があることを指摘した。第3図はYoshikado (1992) による数値実験の結果である。都市がある場合には、海風前線を形成する上昇流が特に明瞭であり、海風自体の水平風速も大きいと同時に、前線よりも内陸側の上層にはっきりとした内陸



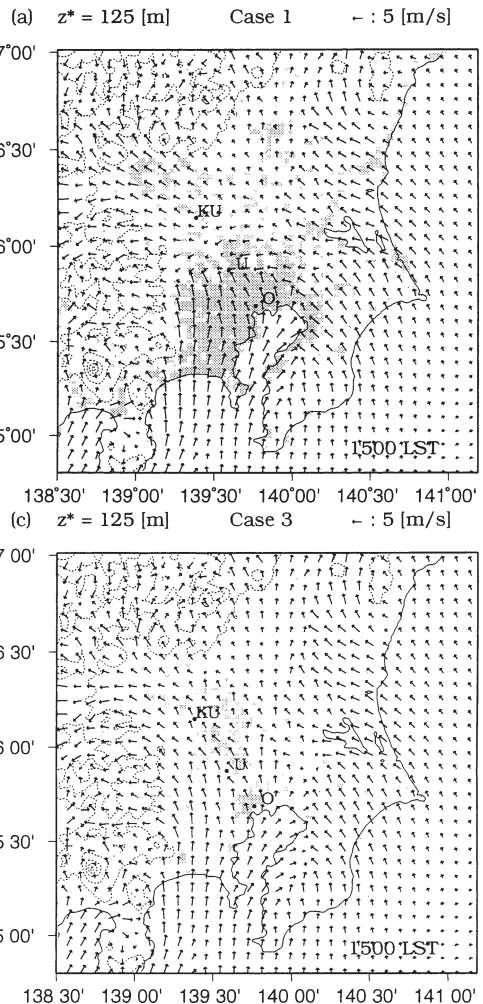
第3図 海風の数値シミュレーション. 13時における風の鉛直断面図. (a) 都市がない場合, (b) 沿岸に都市がある場合. Yoshikado (1992) より.

に向かう風が現れている. また, 都市周縁部で海風前線が数時間停滞している. これらの傾向は, その後, 関東平野での大規模観測 (Yoshikado and Kondo 1989) や Kusaka *et al.* (2000) による関東平野を対象とした3次元シミュレーションでも確認されている (第4図). 最近では, 非静力学モデルを用いたシミュレーションも行われている (例えば, Martilli 2003; Lemonsu *et al.* 2006; Edmilson *et al.* 2007). 今までの研究は単体の都市を取り扱ったケースであるが, 都市が複数存在する地理的条件下で発生するヒートアイランド現象と海風循環の相互作用に関する研究が, Ohashi and Kida (2002a, b) によってなされている. Ohashi and Kida (2002b) は, 京阪地域を対象にして数値シミュレーションを行い, この地域では海風前線の停滞が認められない, 大阪と京都をつなぐような流れが形成されるなど, 関東平野とは異なる流れのパターンを検出した. 大阪付近にある海風循環と京都で発生するヒートアイランド循環を結ぶこの流れを, 彼らは「chain flow」と名付けた.

#### 4. メソスケールモデル

##### 4.1 メソスケールモデルの利用

3次元モデルを用いたヒートアイランドのシミュ



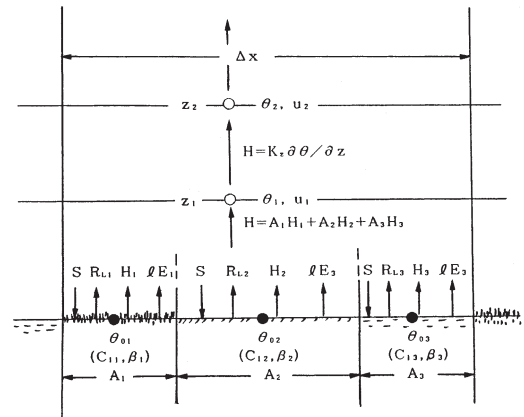
第4図 夏季晴天弱風日における局地風の3次元シミュレーションの結果. 上図は1985年の土地利用を用いたとき, 下図は1900年の土地利用を用いたときの午後3時の地上風系. 灰色の部分は都市域を意味する. Kusaka *et al.* (2000) より.

レーションは1970年代にはじまり (例えば, Atwater 1975; Vukovich *et al.* 1976; Vukovich and King 1980; Hjelmfelt 1982), 1990年代以降には広く行われるようになった (例えば, Seaman *et al.* 1989; Kimura and Takahashi 1991; Saitoh *et al.* 1996; Mochida *et al.* 1997; Kitada *et al.* 1998; Hafner and Kidder 1999; Ichinose *et al.* 1999; Taha 1999; Kusaka *et al.* 2000; Kanda *et al.* 2001; Ohashi and Kida 2002b; Zehnder 2002; Atkinson 2003; Rozoff *et al.* 2003; Hirano *et al.* 2004; Kotroni and

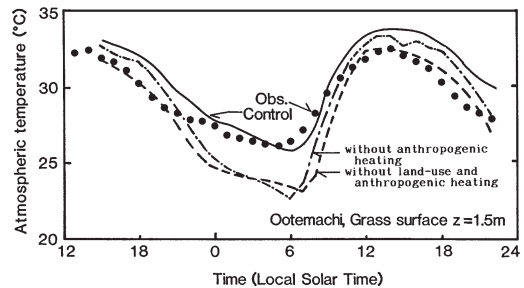
Lagouvardos 2004 ; Grossman-Clarke *et al.* 2005 ; Dandou *et al.* 2005 ; De Ridder 2006 ; Liu *et al.* 2006). 1990年代は静力学平衡を仮定した静力学モデルが主流であったが、現在は非静力学モデルが主流となっている。多くのメソモデルでは、平板都市モデルを利用することによって都市の効果がモデルに反映されている（地表面フラックスが運動方程式や熱力学の式の拡散項の下部境界条件として働くため）。

3次元メソモデルを用いた都市気象研究の先駆者として東京大学の大学院生（当時）であった高野があげられる（Takano 1977）。地表面パラメータの感度実験を実施しヒートアイランドのメカニズムを議論するなど、彼が行った数値実験は当時としては非常に先進的だったと伝えられている。しかしながら、研究成果が学術誌に掲載されていないため、その成果はあまり広く知られていない。1970年代、80年代にヒートアイランド研究で用いられていた3次元モデルの多くは、地表面の熱収支モデルが含まれていない、すなわち地表面と大気間のフィードバックが考慮されていないものだった。一方、1990年代以降のメソスケールモデルでは、これらの効果が考慮されるようになった。Seaman *et al.* (1989) はメソスケールモデルMM4に現実大気の初期値と境界値を与え、セントルイスにおける現実的なシミュレーションを行った。彼の研究により、メソスケールモデルが都市の大気境界層の時間変化などを現実に近い形で再現できるパフォーマンスを持っていることが確認された。Kimura and Takahashi (1991) は道路や草地といった異なる土地被覆から計算されたフラックスの面積加重平均値を格子平均フラックスとみなすKimura (1989) のスキームを彼らのメソスケールモデルに導入した（第5図）。さらには、消費エネルギー用途別に床面積や自動車の走行台数などに係数を乗じて排熱を推定する方法（原単位法）を用いて人工排熱マップを作成し、モデルに人間活動の効果を反映させた。Kimura and Takahashi (1991) はこの都市気象モデルを用いて、現状のシミュレーション、都市を緑地に戻したシミュレーション、都市を緑地に戻しさらには人工排熱を取り除いたシミュレーションを行い、土地利用改変の効果と人工排熱の効果を定量的に評価した（第6図）。Kimura and Takahashi (1991) の改良手法や数値実験のやり方は、その後、多くのモデル研究で参考にされている。

都市のヒートアイランド現象は、雲や降水の頻度を

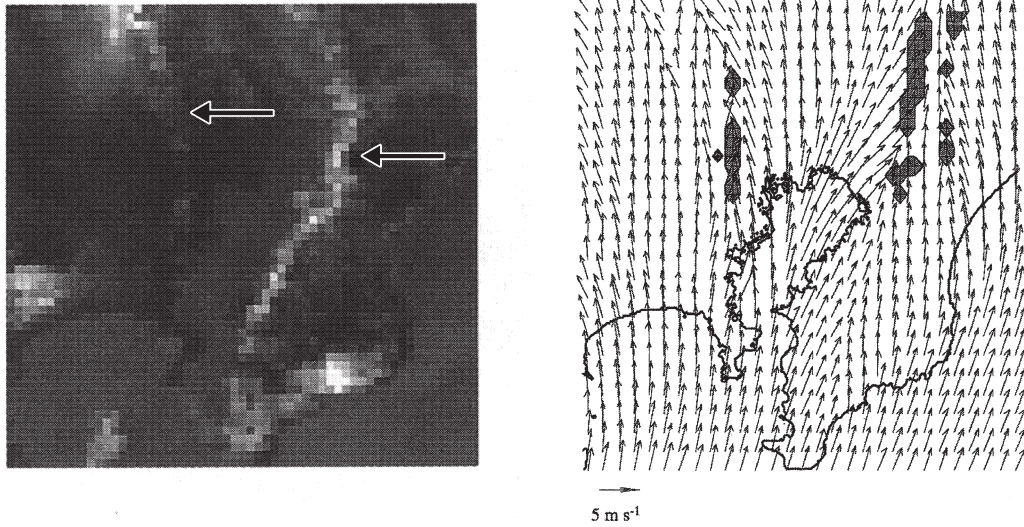


第5図 非一様な地表面上のフラックスの計算スキーム。A1, A2, A3はそれぞれの土地被覆が格子内に占める割合。H1, H2, H3はそれぞれの地表面におけるフラックス。Hは格子平均フラックス。Kimura and Takahashi (1991) より。



第6図 東京における地上気温の日変化。黒丸は夏の典型日36日の観測値の平均値。実線は再現計算（基準ケース）の結果。一点鎖線は基準ケースから人工排熱を除去した場合の結果、破線は基準ケースから人工排熱を除去し都市の地表面を草地に変えた場合の結果。Kimura and Takahashi (1991) より。

高める、あるいは降水系を強化しているとの指摘がある（Shepherd 2005）。日本の場合、地形や海陸分布の影響が大きいため都市が降水におよぼす影響を検出することは難しい。そのような中、藤部（1998）はアメダスデータを用いた詳細な解析により東京で夏季の午後の降水頻度が増加傾向にあることを明らかにした。しかしながら、雲や降水の関係に着目した数値シミュレーション研究の数はそれほど多くはない。都市と雲の関係については、Kanda *et al.* (2001) や Yamada (1999) がメソスケールモデルを用いて、都



第7図 (左図) 衛星画像, 左の矢印が示す雲列が環八雲。(右図) 環八雲のシミュレーション結果, ベクトルは地上風, 灰色は雲分布, Kanda *et al.* (2001) より。

市域の拡大に伴い環八雲の出現場所が変化するという興味深い数値実験を行っている(第7図)。降水については, Baik *et al.* (2001) のような理想化実験や Rozoff *et al.* (2003) や Niyogi *et al.* (2006) のような特定の事例に対する実験が多い。

#### 4.2 メソスケールモデルへの都市キャノピーモデルの導入

これまで紹介してきたような(都市)気象モデルでは, 都市の効果は粗度やアルベドといった地表面パラメータで表現されてきた。この方法は簡便であるが, 夜間の冷却率を過大評価するという問題点も指摘されている(Kimura and Takahashi 1991; Kusaka *et al.* 2001; Zehnder 2002; Kusaka and Kimura 2004a; Kusaka and Hayami 2006)。このような問題を解決するため, 近年, 都市の凹凸効果をより物理的にパラメタライズした都市キャノピーモデルが開発されている。Uno *et al.* (1989) や Brown and Williams (1998) は, 運動方程式や乱流エネルギーの予報方程式に建物抵抗項を導入し, 個々の建物を直接解像せずに建物の力学効果を乱流モデルに取り入れた。Ca *et al.* (2002), Martilli *et al.* (2002), Kondo *et al.* (2005) はこのような力学効果に加えて, 屋根面・個々の壁面・道路面が受け取る放射と熱収支式を計算することにより, 天空率や日陰の効果などの建物の熱的效果をモデルに取り入れた。このタイプのモデル

は, 多層植生キャノピーモデルのアナロジーから, 多層都市キャノピーモデル(あるいは単に多層キャノピーモデル)と呼ばれている。鉛直次元の場合の基礎方程式を式(4)-(6)に記す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m m \frac{\partial u}{\partial z} \right) - c_d a \sqrt{u^2 + v^2} + f(v - v_g) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m m \frac{\partial v}{\partial z} \right) - c_d a \sqrt{u^2 + v^2} - f(u - u_g) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m m \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{Q}{c_p \rho} \quad (6)$$

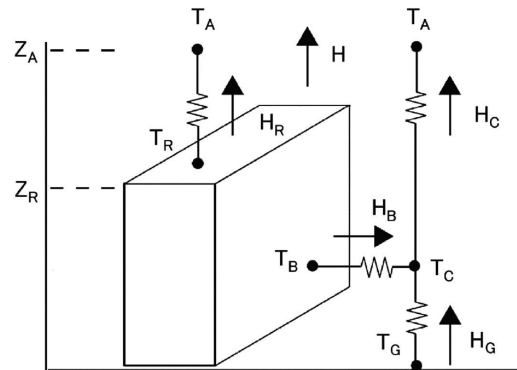
ここで,  $c_d$  と  $a$  は建物に抵抗に関するパラメータ(抵抗係数と表面積),  $m$  はコントロールボリューム内の流体の占める割合,  $Q$  は人工排熱を意味する。このタイプのモデルは, 街区内にある個々の建物の違いまでは考慮していないため街区内の詳細な気温分布を再現することはできないが, 街区平均の地上気温を良好に再現できることが確認されている(Kondo *et al.* 2005; Ohashi *et al.* 2007)。

一方で, Best (1998) は植生キャノピーモデルの一つである Big Leaf モデルのパラメータを都市用に

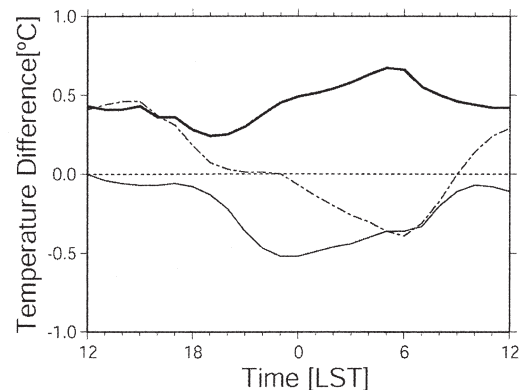
設定する簡易的な都市キャノピーモデルを提案した。Masson (2000) や Kusaka *et al.* (2001) は、都市の凹凸効果を表現するより現実的な都市のキャノピーモデルを開発した (第 8 図)。Masson (2000) や Kusaka *et al.* (2001) の都市キャノピーモデルは、都市キャノピー層を鉛直方向に解像しないため単層都市キャノピーモデル (あるいは単に単層キャノピーモデル) と呼ばれている。

Kusaka *et al.* (2001) は、平板モデル、単層キャノピーモデル、多層キャノピーモデルの比較実験を行い、日中の大きな蓄熱と夜間の正の顕熱フラックスといった都市の熱収支の特徴が、キャノピーモデルで見られ、平板モデルでは見られないことを示した。この比較実験の結果や観測値との比較により、単層キャノピーモデルのパフォーマンスが多層モデルに近く、平板モデルよりも高いことが示された。その後、Lemonsu and Masson (2002), Kusaka and Kimura (2004a) は単層キャノピーモデルをメソモデルへ導入し、この手法がヒートアイランドシミュレーションの再現精度を向上させることを示した。現在, Kusaka *et al.* (2001), Kusaka and Kimura (2004a, b) のモデルは、米国で開発中のメソスケールモデル WRF (Skamarock *et al.* 2005) に公式採用され多くの研究で利用されている。

Kusaka and Kimura (2004b) は Kusaka and Kimura (2004a) で開発したモデルを用いてヒートアイランドの要因解析を行った。第 9 図は地上気温に対する都市の熱的効果, すなわち人工排熱, 熱容量の増加, 天空率による放射冷却の緩和効果の感度実験の結果である。3つの効果は同程度の影響があるがそれぞれが支配的となる時間帯が異なっていることがわかる。一方, Uno *et al.* (1989), Martilli (2002), Tokairin *et al.* (2006) は, メソモデルと多層モデルの結合モデルを用いて, 建物による乱流の生成や風速低下もまた夜間のヒートアイランドに対して重要な役割を果たしていることを示した。また, Ohashi *et al.* (2007) は, メソモデルのシミュレーション結果を境界条件にして, Kondo *et al.* (2005) で開発された多層キャノピーモデルと Kikegawa *et al.* (2003) で開発されたビルエネルギーモデルの結合システム (第 10 図) を動かした。その結果, 東京では冷房廃熱が夏の気温を  $1-2^{\circ}\text{C}$  上昇させているということを示し, 人工排熱の中でもとりわけ冷房廃熱が重要であることを明らかにした。彼らの一連の研究は, メソモデルへと



第 8 図 都市キャノピーモデルの概念図。T は温度, H は顕熱フラックスを意味する。添え字の G は地面, B は建物壁面, R は屋根面, C はキャノピー空間, A は大気モデルの最下層 (参照レベル) を意味する。添え字のない H は, 各面で計算された H の面積重み平均値であり, これが大気モデルに受け渡される。Kusaka *et al.* (2001) を一部改訂。



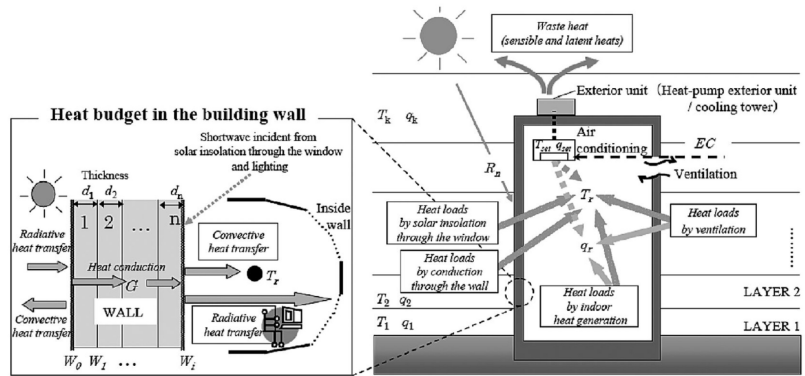
第 9 図 人工排熱と都市の凹凸効果が地上気温におよぼす影響。太実線は基準実験ケース C0 と人工排熱を除去した実験ケース C1 の差 (人工排熱による気温上昇量), 一点鎖線は実験ケース C1 と人工排熱を除去し熱容量を 60% にした実験ケース C2 の差 (負の値が熱容量増加による気温上昇量を意味する), 細実線は実験ケース C1 と人工排熱を除去し建物壁面の放射を除いた実験ケース C3 の差 (負の値が主として放射冷却緩和による気温上昇量を意味する)。Kusaka and Kimura (2004b) より。

キャノピーモデルの結合, さらにはビルエネルギーモデルとの結合が, 都市気象シミュレーションの精度を向上させるだけでなく, メカニズム研究に対しても有

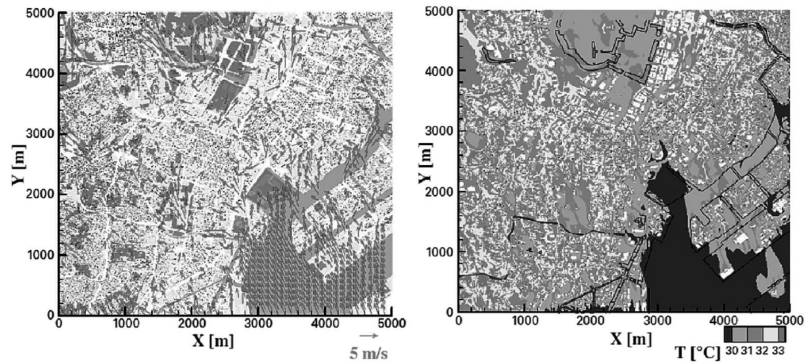
効であることを示唆している。また、建築分野などでは、このような総合モデルをベースにしたソフトウェアを用いてヒートアイランド対策技術の総合的評価を行っている(持田ほか 2000; 村上ほか 2006)。現在、キャノピーモデルの開発・改良およびメソモデルとキャノピーモデルの結合に関する研究は、都市気象モデリング研究の主要なテーマのひとつとなっている(例えば, Dupont *et al.* 2004; Harman *et al.* 2004; Otte *et al.* 2004; Best 2005; Chin *et al.* 2005; Dandou *et al.* 2005; Hagishima *et al.* 2005; Kanda *et al.* 2005; Pearlmutter *et al.* 2005; Roulet *et al.* 2005; De Ridder 2006; Yamada 2006; Dupont and Messtayer 2006; Tomita *et al.* 2007; Zhang *et al.* 2007; Narita 2007; 萩島ほか 2007)。

5. 今後の課題

計算機の発達と気象モデルの高精度化, 気象モデルとCFDモデル(数値流体力学モデル, 例えば, Murakami *et al.* 1999)のネスティングにより, 水平格子間隔が数100 m以下の超高解像度計算が可能になりつつある(Yamada 2006; Ashie *et al.* 2007)。たとえば, Ashie *et al.* (2007)は空間解像度5 mのCFDモデルを地球シミュレータで動かすことにより, 東京湾岸エリアの詳細な風系と気温分布を再現している(第11図)。しかしながら, このような超高解像度計算に対しては, (1) 数値モデルの検証データとしての観測値の空間代表性の問題(例えば, Sugawara *et al.* 2004), (2) 乱流モデルをはじめとする物理モデルの適用限界の問題(例えば, Wyngaard 2004), (3) カオスの顕在化による予報可能性の問題(例えば,



第10図 ビルエネルギーモデルの概念図. Kikegawa *et al.* (2003) より。

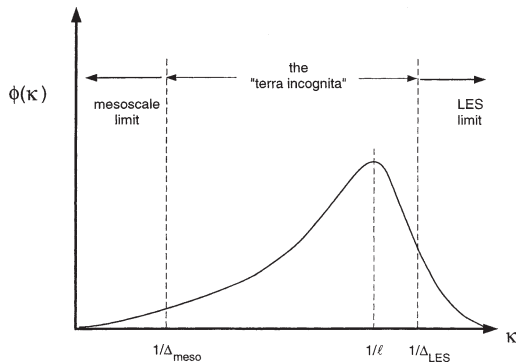


第11図 地球シミュレータと空間解像度5 mのCFDモデルを用いて再現された地上10 mの(左図)風系と(右図)気温. Ashie *et al.* (2007) より。

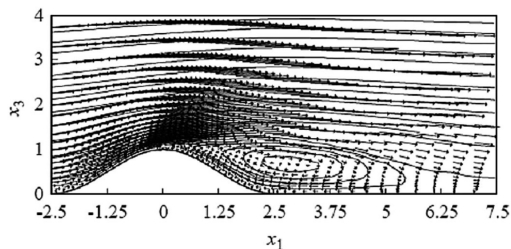
Zeng and Pielke 1993), (4) 各々異なるタイプの乱流モデルを採用している気象モデルとCFDモデルの結合方法の問題など, いくつかの壁が存在している。(1)は主として観測の問題, (4)は主としてCFDモデルの問題なので, ここでは, (2)と(3)に着目し, これらの問題を簡単に述べることにする。

空間分解能を高くすると, 気象モデルで再現される循環の水平規模と混合層内に発生する乱流のうちの最大の乱流渦の水平規模が接近する。気象条件により異なるが, 風の弱い日中などでは格子間隔がおおよそ200~500 m程度になったときにこのような状況になる。気象モデルでは, 乱流スケール(波数ごとの乱流エネルギーが最大となる空間規模,  $L$ )が格子間隔(厳密には数値モデルで直接解くことのできる最小の空間規模,  $\Delta$ )より十分小さいとして, それによる熱や運動量フラックスをパラメタリゼーションしている。しかしながら乱流スケール  $L$  と格子間隔  $\Delta$  の空間





第12図 Terra Incognita の領域。横軸は水平波数。縦軸はその乱流エネルギースペクトル。 $\Delta_{\text{meso}}$ はメソスケールモデルで表すことができる長さスケールの最小値、 $\Delta_{\text{LES}}$ はLESモデルで表すことができる長さスケールの最大値。



第13図 LESモデルで使われる唯一のパラメータであるスマゴリンスキー定数を地表面近傍では静的に与え、その上空では変化させるダイナミックモデル（ハイブリッドモデル）を用いたVery Large Eddy Simulationの結果。風ベクトルと流線。Iizuka and Kondo (2004) より。

規模が接近すると、理論的な根拠を失うため、精度・信頼性が著しく低下する可能性がある。一方、LESの場合、格子間隔が慣性小領域にあれば、精度の高いサーマルや大気乱流の計算が可能である。しかしながら、発達した積乱雲を再現するために必要な計算領域は、サーマルに対する計算よりもずっと広く、50 km四方以上である。したがって、サーマルの発達と対流性降水を同時に再現するためには、格子間隔が水平・鉛直とも10 m程度でかつ計算範囲を50 km以上に設定しなくてはならない。2007年現在の計算機ではほとんど不可能である。この問題は、ちょうど大気大循環モデルにおける積雲対流のパラメタリゼーションの扱いの問題に似ている（現在、地球シミュレータと全球

雲解像モデルの登場によってこれらの問題は克服されつつある）。Wyngaard (2004) はLESと気象モデルの間にあるこのスケール（第12図）を“Terra Incognita（未踏の大地）”と呼び、新たなパラメタリゼーションの必要性を主張している。この未踏の大地を征服するためには、現在の計算機でも実行可能な解像度（100 m程度）でサーマルのようなものを適切に表現できるモデルを構築する、あるいは10 m程度の空間分解能を持つLESモデルを走らすことができる計算機の出現を待つ、の二つの道がある。前者に関しては、第13図にあるようなVery Large Eddy Simulation（例えばIizuka and Kondo 2004）やLES-within-LESネスティング（例えばMoeng *et al.* 2007）という考え方などがあり、後者に関しては10 PETA FLOPS（1秒間に1京回）の演算が可能で次世代の京速コンピュータの登場を待つという考え方などがある。どちらを選ぶか、あるいは第三の道を探すべきか、活発な議論が望まれる。

Terra Incognitaの問題は、いわば時代の流れでできてきた問題である。その一方で、もっと古典的な問題も存在する。予測可能性の問題である。仮に、乱流のパラメタリゼーションの改良により、サーマルのような乱流に近い流れをシミュレートできるようになったとしても、シミュレーション結果にカオス的な性質が残るため、同条件で計算しても微細な初期値の差によって大きく結果が異なってしまう可能性がある。この問題を回避するための最も単純な方法はアンサンブル予測かもしれない。しかしながら、この方法は膨大な計算機資源を必要とする一方で、このスケールの場合、初期時刻において適切な摂動を与えることは非常に難しい。予測可能性の問題は、降水のような非線形性の強い現象に対してより顕著に現れると思われる。都市降水や都市内の局地風のような現象に対して意味のあるシミュレーション結果、精度の良いシミュレーション結果を得るための努力を今後も続けていく必要がある。

## 謝辞

本研究の一部は、環境省の地球環境研究総合推進費(S-5)の支援により実施された。

## 参考文献

Arnfield, A. J., 2000 : A simple model of urban canyon energy budget and its validation. *Phys. Geogr.*, 21,

- 305-326.
- Ashie, Y., N. Komatsu, T. Kono and K. Takahashi, 2007 : Numerical simulation of urban thermal environment in the waterfront area of Tokyo. Annual Report of the Earth Simulator Center, April 2005-March 2006, The Earth Simulator Center (JAMSTEC), 83-87.
- Atkinson, B. W., 2003 : Numerical modeling of urban heat-island intensity. *Bound.-Layer Meteor.*, **109**, 285-310.
- Atwater, M. A., 1972 : Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer. *Bound.-Layer Meteor.*, **3**, 229-245.
- Atwater, M. A., 1975 : Thermal changes induced by urbanization and pollutants. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 1061-1071.
- Baik, J.-J., Y.-H. Kim and H.-Y. Chun, 2001 : Dry and moist convection forced by an urban heat island. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 1462-1475.
- Best, M. J., 1998 : A model to predict surface temperatures. *Bound.-Layer Meteor.*, **88**, 279-306.
- Best, M. J., 2005 : Representing urban areas within operational numerical weather prediction models. *Bound.-Layer Meteor.*, **114**, 91-109.
- Bornstein, R. D., 1975 : The two-dimensional URBMET urban boundary layer model. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 1459-1477.
- Brown, M. and M. Williams, 1998 : An urban canopy parameterization for mesoscale Meteorological models. Proceedings of 2nd AMS Urban Environmental Symposium, Albuquerque, New Mexico, November 2-7, 1998, American Meteorological Society.
- Ca, V. T., Y. Ashie and T. Asaeda, 2002 : A  $k-\epsilon$  turbulence closure model for the atmospheric boundary layer including urban canopy. *Bound.-Layer Meteor.*, **102**, 459-490.
- Chin, H. N. S., M. J. Leach, G. A. Sugiyama, J. M. Leone, H. Walker, J. S. Nasstrom and M. J. Brown, 2005 : Evaluation of an urban canopy parameterization in a mesoscale model using VTMX and URBAN 2000 data. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 2043-2068.
- Dandou, A., M. Tombrou, E. Akylas, N. Soulakellis and E. Bossioli, 2005 : Development and evaluation of an urban parameterization scheme in the Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). *J. Geophys. Res.*, **110**, D10102, doi : 10.1029/2004JD005192.
- Delage, Y. and P. A. Taylor, 1970 : Numerical studies of heat island circulations. *Bound.-Layer Meteor.*, **1**, 201-226.
- De Ridder, K., 2006 : Testing Brutsaert's temperature roughness parameterization for representing urban surfaces in atmospheric models. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13403, doi : 10.1029/2006GL026572.
- Dupont, S. and P. G. Mestayer, 2006 : Parameterization of the urban energy budget with the submesoscale soil model. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **45**, 1744-1765.
- Dupont, S., T. L. Otte and J. K. S. Ching, 2004 : Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model (MM5). *Bound.-Layer Meteor.*, **113**, 111-158.
- Edmilson, F., C. Rozoff, W. Cotton and P. Dias, 2007 : Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan of Sao Paulo, Brazil. *Bound.-Layer Meteor.*, **122**, 43-65.
- Estoque, M. A., 1961 : A theoretical investigation of the sea breeze. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **87**, 136-146.
- Estoque, M. A., 1963 : A numerical model of the atmospheric boundary layer. *J. Geophys. Res.*, **68**, 1103-1113.
- Estoque, M. A. and C. M. Bhumralkar, 1969 : Flow over a localized heat source. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 850-859.
- 藤部文昭, 1998 : 東京における降水の空間偏差と経年変化の実態—都市効果についての検討—. *天気*, **45**, 7-18.
- Goward, S. N., 1981 : Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island. *Phys. Geogr.*, **2**, 19-33.
- Grimmond, C. S. B. and T. R. Oke, 1999 : Heat storage in urban areas : Local-scale observations and evaluation of a simple model. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 922-940.
- Grimmond, C. S. B., H. A. Cleugh and T. R. Oke, 1991 : An objective urban heat storage model. *Atmos. Environ.*, **25B**, 311-326.
- Grossman-Clarke, S., J. A. Zehnder, W. L. Stefanov, Y. Liu and M. A. Zoldak, 2005 : Urban modifications in a mesoscale meteorological model and the effects on near-surface variables in an arid metropolitan region. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 1281-1297.
- Hafner, J. and S. Q. Kidder, 1999 : Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 448-465.
- Hagishima, A., J. Tanimoto and K. Narita, 2005 : Inter-comparisons of experimental convective heat transfer coefficients and mass transfer coefficients of urban surfaces. *Bound.-Layer Meteor.*, **117**, 551-576.
- 萩島 理, 谷本 潤, 永山浩二, 古賀正浩, 2007 : 高さの分布のある直方体粗度群の抗力係数に関する風洞実験. *日本建築学会環境系論文集*, (619), 39-45.
- Harman, I. N., J. F. Barlow and S. E. Belcher, 2004 :

- Scalar fluxes from urban street canyons. Part 2 : Model, Bound.-Layer Meteor., **113**, 387-410.
- Hirano, Y., Y. Yasuoka and T. Ichinose, 2004 : Urban climate simulation by incorporating satellite-derived vegetation cover distribution into a mesoscale meteorological model. Theor. Appl. Clim., **79**, 175-184.
- Hjelmfelt, M. R., 1982 : Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary-layer airflow and vertical air motion : Simulations of urban vs non-urban effects. J. Appl. Meteor., **21**, 1239-1257.
- Ichinose, T., K. Shimodozono and K. Hanaki, 1999 : Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. Atmos. Environ., **33**, 3897-3909.
- Iizuka, S. and H. Kondo, 2004 : Performance of various sub-grid scale models in large-eddy simulations of turbulent flow over complex terrain. Atmos. Environ., **38**, 7083-7091.
- Johnson, G. T., T. R. Oke, T. J. Lyons, D. G. Steyn, I. D. Watson and J. A. Voogt, 1991 : Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night, Part 1 : Theory and tests against field data. Bound.-Layer Meteor., **56**, 275-294.
- Kanda, M., Y. Inoue and I. Uno, 2001 : Numerical study on cloud lines over an urban street in Tokyo. Bound.-Layer Meteor., **98**, 251-273.
- Kanda, M., T. Kawai, M. Kanega, R. Moriwaki, K. Narita and A. Hagishima, 2005 : A simple energy balance model for regular building arrays. Bound.-Layer Meteor., **116**, 423-443.
- Kikegawa, Y., Y. Genchi, H. Yoshikado and H. Kondo, 2003 : Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban building's energy-demands. Appl. Energy, **76**, 449-466.
- Kimura, F., 1989 : Heat flux on mixtures of different land-use surface : Test of a new parameterization scheme. J. Meteor. Soc. Japan, **67**, 401-409.
- Kimura, F. and S. Takahashi, 1991 : The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area : A numerical experiment. Atmos. Environ., **25B**, 155-164.
- Kimura, R., N. Misawa, J. Sagami and T. L. Kunii, 1977 : Effects of general flows on a heat island convection. Part 2 : Numerical and laboratory experiments for the shear flow. J. Meteor. Soc. Japan, **55**, 32-51.
- Kitada, T., K. Okamura and S. Tanaka, 1998 : Effects of topography and urbanization on local winds and thermal environment in the Nohbi Plain, coastal region of central Japan : A numerical analysis by mesoscale meteorological model with a k- $\epsilon$  turbulence model. J. Appl. Meteor., **37**, 1026-1046.
- Kondo, H., Y. Genchi, Y. Kikegawa, Y. Ohashi, H. Yoshikado and H. Komiyama, 2005 : Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city : Structure of the urban canopy model and its basic performance. Bound.-Layer Meteor., **116**, 395-421.
- 近藤純正, 1994 : 水環境の気象学. 朝倉書店, 351pp.
- Kotroni, V. and K. Lagouvardos, 2004 : Evaluation of MM5 high-resolution real-time forecasts over the urban area of Athens. Greece. J. Appl. Meteor., **43**, 1666-1678.
- 日下博幸, 2004 : 都市の気象. 局地気象学 (堀口郁夫, 塚本 修, 小林哲夫, 大槻恭一編), 森北出版, 196-204.
- Kusaka, H. and H. Hayami, 2006 : Numerical simulation of local weather for a high photochemical oxidant event using the WRF model. JSME Int. J., **49B**, 72-77.
- Kusaka, H. and F. Kimura, 2004a : Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model : Impact on urban heat island simulation for an idealized case. J. Meteor. Soc. Japan, **82**, 67-80.
- Kusaka, H. and F. Kimura, 2004b : Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island : Numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model. J. Appl. Meteor., **43**, 1899-1910.
- Kusaka, H., F. Kimura, H. Hirakuchi and M. Mizutori, 2000 : The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area. J. Meteor. Soc. Japan, **78**, 405-420.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa and F. Kimura, 2001 : A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models : Comparison with multi-layer and slab models. Bound.-Layer Meteor., **101**, 329-358.
- Lemonsu, A. and V. Masson, 2002 : Simulation of a summer urban breeze over Paris. Bound.-Layer Meteor., **104**, 463-490.
- Lemonsu, A., G. Pigeon, V. Masson, and C. Moppert, 2006 : Sea-town interactions over Marseille : 3D urban boundary layer and thermodynamic fields near the surface. Theor. Appl. Clim., **84**, 171-178.
- Liu, Y., Chen F., T. Warner and J. Basara, 2006 : Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma City area during the

- Joint Urban 2003 field project. *J. Appl. Meteor.*, **45**, 912-919.
- Martilli, A., 2002 : Numerical study of urban impact on boundary layer structure : Sensitivity to wind speed, urban morphology, and rural soil moisture. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 1247-1266.
- Martilli, A., 2003 : A two-dimensional numerical study of the impact of a city on atmospheric circulation and pollutant dispersion in a coastal environment. *Bound.-Layer Meteor.*, **108**, 91-119.
- Martilli, A., A. Clappier and M. W. Rotach, 2002 : An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Bound.-Layer Meteor.*, **104**, 261-304.
- Masson, V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteor.*, **94**, 357-397.
- McElroy, J., 1973 : A numerical study of the nocturnal heat island over a medium-sized mid-latitude city (Columbus, Ohio). *Bound.-Layer Meteor.*, **3**, 442-453.
- Mills, G., 1997 : An urban canopy-layer climate model. *Theor. Appl. Clim.*, **57**, 229-244.
- Mochida, A., S. Murakami, T. Ojima, S. Kim, R. Ooka and H. Sugiyama, 1997 : CFD analysis of mesoscale climate in the Greater Tokyo area. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **67 & 68**, 459-477.
- 持田 灯, 村上周三, 金 相璣, 近藤裕昭, 島田昭男, 玄地 裕, 吉田伸治, 2000 : ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合評価のための Software Platform の開発と風環境の解析事例. 第16回風工学シンポジウム論文集, 137-142.
- Moeng, C. H., J. Dudhia, J. Klemp and P. Sullivan 2007 : Examining two-way grid nesting for large eddy simulation of the PBL using the WRF model. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2295-2311.
- Murakami, S., R. Ooka, A. Mochida, S. Yoshida and S. Kim, 1999 : CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **81**, 57-81.
- 村上周三, 松縄 堅, 持田 灯, 丹羽英治, 大岡龍三, 足永靖信, 谷本 潤, 森川泰成, 柳原隆司, 2006 : ヒートアイランド現象緩和に関する評価システム CASBEE-HI の開発. 日本建築学会技術報告集, (23), 247-252.
- Myrup, L. O., 1969 : A numerical model of the urban heat island. *J. Appl. Meteor.*, **8**, 908-918.
- Myrup, L. O., 1970 : A corrigendum. *J. Appl. Meteor.*, **9**, 541.
- 中西幹郎, 近藤純正, 日下博幸, 山田哲司, 木村富士男, 近藤裕昭, 菅原広史, 2006 : 第26回「メソ気象研究会」の報告—21世紀の境界層研究の役割と課題. *天気*, **53**, 829-834.
- Narita, K., 2007 : Experimental study of the transfer velocity for urban surfaces with a water evaporation method. *Bound.-Layer Meteor.*, **122**, 293-320.
- Niino, H., A. Mori, T. Satomura and S. Akiba, 2006 : Flow regimes of nonlinear heat island circulation. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1538-1547.
- Niyogi, D., T. Holt, S. Zhong, P. C. Pyle and J. Basara, 2006 : Urban and land surface effects on the 30 July 2003 mesoscale convective system event observed in the southern Great Plains. *J. Geophys. Res.*, **111**, D19107, doi : 10.1029/2005JD006746.
- Ohashi, Y. and H. Kida, 2002a : Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas : A numerical study with a mesoscale atmospheric model. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 30-45.
- Ohashi, Y. and H. Kida, 2002b : Effects of mountains and urban areas on daytime local-circulations in the Osaka and Kyoto regions. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 539-560.
- Ohashi, Y., Y. Genchi, H. Kondo, Y. Kikegawa, H. Yoshikado and Y. Hirano, 2007 : Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer : Numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model. *J. Appl. Meteor.*, **46**, 66-81.
- Oke, T. R., G. T. Johnson, D. G. Steyn and I. D. Watson, 1991 : Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 2 : Diagnosis of causation, *Bound.-Layer Meteor.*, **56**, 339-358.
- Olfe, D. B. and R. L. Lee, 1971 : Linearized calculations of urban heat island convection effects. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1374-1388.
- Otte T. L., A. Lacser, S. Dupont, and J. K. S. Ching, 2004 : Implementation of an urban canopy parameterization in a mesoscale meteorological model. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 1648-1665.
- Outcalt, S. I., 1972a : The development and application of a simple digital surface-climate simulator. *J. Appl. Meteor.*, **11**, 629-636.
- Outcalt, S. I., 1972b : A reconnaissance experiment in mapping and modeling the effect of land use on urban thermal regimes. *J. Appl. Meteor.*, **11**, 1369-1373.
- Patrinos, A. A. N. and A. L. Kistler, 1977 : A numerical study of the Chicago lake breeze. *Bound.-Layer Meteor.*, **12**, 93-123.
- Pearlmutter, D., P. Berliner and E. Shaviv, 2005 : Evaluation of urban surface energy fluxes using an open-

- air scale model. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 532-545.
- Roulet, Y.-A., A. Martilli, M. W. Rotach and A. Clappier, 2005 : Validation of an urban surface exchange parameterization for mesoscale models—1 D case in a street canyon. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 1484-1498.
- Rozoff, C. M., W. R. Cotton and J. O. Adegoke, 2003 : Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 716-738.
- Saitoh, T. S., T. Shimada and H. Hoshi, 1996 : Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island. *Atmos. Environ.*, **30**, 3431-3442.
- Savijarvi, H., 1985 : The sea breeze and urban heat island circulation in a numerical model. *Geophysica*, **21**, 115-126.
- Sawai, T., 1978 : Formation of the urban air mass and the associated local circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **56**, 159-174.
- Schultz, P. and T. T. Warner, 1982 : Characteristics of summertime circulations and pollutant ventilation in the Los Angeles basin. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 672-682.
- Seaman, N. L., F. L. Ludwig, E. G. Donall, T. T. Warner and C. M. Bhumralker, 1989 : Numerical studies of urban planetary boundary-layer structure under realistic synoptic condition. *J. Appl. Meteor.*, **28**, 760-781.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005 : A description of the advanced research WRF version 2, NCAR/TN-468+STR, 88pp.
- Shepherd, J. M., 2005 : A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interactions*, **9**, 1-27.
- 菅原広史, 近藤純正, 1995 : 都市における各種地表面温度の敏感度解析. *天気*, **42**, 813-818.
- Sugawara, H., K. Narita and T. Mikami 2001 : Estimation of effective thermal property parameter on a heterogeneous urban surface. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 1169-1181.
- Sugawara, H., K. Narita and T. Mikami, 2004 : Representative air temperature of thermally heterogeneous urban areas using the measured pressure gradient. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 1168-1179.
- 菅原広史, 大橋唯太, 日下博幸, 近藤裕昭, 浜田 崇, 山本奈美, 2006 : 第6回国際都市気候会議 (6th International Conference on Urban Climate) ICUC6報告. *天気*, **53**, 919-924.
- Taha, H., 1999 : Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage : A bulk-parameterization approach. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 466-473.
- Takano, K., 1977 : Three-dimensional numerical modeling of the land and sea breezes and the urban heat island in the Kanto Plain. Ph. D. Thesis of University of Tokyo.
- Tapper, N. J., P. D. Tyson, I. F. Owens and W. J. Hastie, 1981 : Modeling the winter urban heat island over Christchurch, New Zealand. *J. Appl. Meteor.*, **20**, 365-376.
- Tokairin, T., H. Kondo, H. Yoshikado, Y. Genchi, T. Ihara, Y. Kikegawa, Y. Hirano and K. Asahi, 2006 : Numerical study on the effect of buildings on temperature variation in urban and suburban areas in Tokyo. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 921-937.
- Tomita, T., H. Kusaka, R. Akiyoshi and Y. Imasato, 2007 : Thermal and geometric controls on the rate of surface air temperature changes in a medium-sized, midlatitude city. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **46**, 241-247.
- Uno, I., H. Ueda and S. Wakamatsu, 1989 : Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer. *Bound.-Layer Meteor.*, **49**, 77-98.
- Vukovich, F. M., 1971 : Theoretical analysis of the effect of mean wind and stability on a heat island circulation characteristic of an urban complex. *Mon. Wea. Rev.*, **99**, 919-926.
- Vukovich, F. M., 1973 : A study of the atmospheric response due to a diurnal heating function characteristic of an urban complex. *Mon. Wea. Rev.*, **101**, 467-474.
- Vukovich, F. M. and W. J. King, 1980 : A theoretical study of the St. Louis heat island : Comparisons between observed data and simulation results on the urban heat island circulation. *J. Appl. Meteor.*, **19**, 761-770.
- Vukovich, F. M., J. W. Dunn and B. W. Crissman, 1976 : A theoretical study of the St. Louis heat island : The wind and temperature distribution. *J. Appl. Meteor.*, **15**, 417-440.
- Wyngaard, J. C., 2004 : Toward numerical modeling in the "Terra Incognita". *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1816-1826.
- Yamada, T., 1999. A numerical simulation of urbanization on the local climate. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **81**, 1-19.
- Yamada, T., 2006 : Numerical simulations of urban heat islands and transport and dispersion of airborne materials around building clusters. Sixth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 2006, Atlanta, GA.
- Yoshikado, H., 1992 : Numerical study of the daytime

- urban effect and its interaction with the sea breeze. *J. Appl. Meteor.*, **31**, 1146-1164.
- Yoshikado, H., and H. Kondo, 1989 : Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo. *Bound.-Layer Meteor.*, **48**, 389-407.
- Yu, T.-W. and N. K. Wagner, 1975 : Numerical study of the nocturnal urban boundary layer. *Bound.-Layer Meteor.*, **9**, 143-162.
- Zehnder, J. A. 2002 : Simple modifications to improve fifth-generation Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model performance for the Phoenix, Arizona, metropolitan area. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 971-979.
- Zeng, X. and R. A. Pielke. 1993 : Error-growth dynamics and predictability of surface thermally induced atmospheric flow. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2817-2844.
- Zhang, H., N. Sato, T. Izumi, K. Hanaki and T. Aramaki, 2007 : Modified RAMS-Urban canopy model for heat island simulation in Chongqing, China. submitted to *J. Appl. Meteor. Clim.*

---

## Urban Climate Modeling Studies and Future Problems

Hiroyuki KUSAKA\*

\* *Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan.*

(Received 3 July 2007 ; Accepted 12 February 2008)

---