

都市温暖化の構造物を考慮に入れたマイクロモデリングに関する研究

Study Microscopic Modeling of Urban Warming

山田 昇 *1
Noboru YAMADA

斎藤 武雄 *2
Takeo S. SAITO

Abstract

Horizontal scale of the urban warming in a huge city like Tokyo is about 50 ~ 100 km. In order to simulate such a large-scale problem by a numerical method, microscopic phenomena in the urban surface layer have been generally incorporated by a simplified modeling. For example, the effect of urban building structures has been considered by employing a roughness parameter in many past studies. This approach seems to be appropriate as long as we analyze large-scale phenomena. However, if we need to analyze small-scale or micro-scale phenomena, which are strongly influenced by building structures, existing coarse modeling and estimation employing such a roughness parameter are no longer valid. This paper describes a microscopic modeling for urban surface layer, where a lot of various structures (i.e. building, bridge, pavement, and other facilities) exist. The authors found out a structural similarity between urban structure and porous media. Flow model and method of analysis in porous media were applied to the microscopic modeling for urban surface layer. First, 2-D numerical study and experimental verification were conducted on unsteady natural convection. Resultant model will be used for more precise 3-D computer simulation of urban warming and urban planning.

キーワード： 都市温暖化, ヒートアイランド, 都市境界層, 熱対流, マイクロスケールモデル, 多孔質, 数値シミュレーション, 対流実験

Key Words : Urban Heat Island, Urban Warming, Urban Surface Layer, Thermal Plume, Microscopic Modeling, Porous Media, Numerical Simulation, Experimental Investigation.

1. 緒 言

都市温暖化(ヒートアイランド)の水平スケールは、東京を例にとると、おおよそ50~100 kmであり、気象学的にはメソスケール(Meso-scale)の現象である。一般にこのような大規模スケールの問題を解析する場合、大規模スケールの中に存在する小規模・微小規模スケールの現象は、なんらかの方法によって適当なモデル化がなされた上で解析に組み込まれる。都市温暖化においては、粗度パラメータや大気乱流の取り扱いがその例として挙げられる。このような手法は、巨視的な観点でのアプローチという意味では、多くの場合妥当なものであり、実際、使われてきた。

しかしながら、今後の都市環境のシミュレーション解析に求められるのは、人々の生活空間としての、よりミクロな環境における熱環境評価である。すなわち、実際の都市の建物、道

路、緑地、水面などが配置された空間が人々の生活空間として熱環境の観点からみて適當かどうか、また、どうあるべきなのか、そして、それが、よりスケールの大きい現象とどのように関わっているのかを明らかにすることが重要な課題である。ミクロな観点での解析では、都市構造物等の影響をこれまでのような巨視的なパラメータで置き換えることは妥当ではない。一つの方法としては、全ての構造物に対して最適なメッシュを生成し、それを乱流直接シミュレーション(DNS : Direct Numerical Simulation)で解くことが考えられるが、現状では、建築学の分野で報告されているように、せいぜい数棟~数十棟の建物周りの解析が限度である。都市においては、数km以下の気象学的にみてミクロな領域においても、数千、数万のオーダーの構造物が存在するため、そのような解法は事実上不可能に近い。それゆえに新たな微視的なモデリング、すなわちマイクロモデリングが必要となる。

そこで本報では、よりミクロな都市熱環境評価へのアプローチの一環として、これまでの研究ではほとんど考慮されていなかったマイクロスケールで都市温暖化を捉え、独自のモデリングを提案し、その妥当性について検証する。

*1 東北大学工学部助手(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)
e-mail : noboru@cc.mech.tohoku.ac.jp

*2 東北大学工学部教授(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)
(原稿受付：2002年1月25日)

2. 構造物を考慮した都市温暖化モデリングの構築

本研究における数値モデリングでは、都市構造物の林立する都市の接地境界層（Urban surface boundary layer; または都市キャノピー層; Urban canopy layer）を特殊な性質を有する多孔質構造(Porous media)と見なし、伝熱工学の分野における「多孔質流れモデル(Porous flow model)」を応用した。

都市温暖化は、これまでの多くの研究では、大気境界層内における大規模な局地循環現象として捉えられ、気象学的な方程式系によるアプローチがなされてきた。齋藤ら^{(1)~(14)}による研究の特色は、都市温暖化を局所加熱による浮力流れ問題として捉え、伝熱工学の手法を応用した方程式系を用いていることである。本研究においても、基本的に齋藤らによって開発されたモデリングを踏襲する。そして、都市構造物の影響をうまく考慮するための工夫として、「多孔質流れモデル」を応用する。

2.1 都市構造と多孔質構造との相似性

Fig.1に都市構造の平面図と一般的な多孔質の構造図、およびモデル図を示す。これから両者の平面的な構造にある種の相似性(Similarity)を見出しができると考えた。多孔質とは、一般に小さな空隙が多岐に連結された流路をもつ構造体を指し、この定義からも都市構造を一種の多孔質構造みなすことは有意義であると考える。つまり、都市において過密する構造物の間隙における熱流体の挙動と多孔質材の間隙における熱流体の挙動との相似性を仮定する。ここで、都市構造では以下の点に注意する必要がある。

- (1) 空間的な空隙率の分布がある。とくに鉛直方向では上方になるほど空隙率(Porosity)は大きくなり、やがて1になる。
- (2) 水平方向と比較して、鉛直方向の透過性が良い。
- (3) 流れは乱流である。

一方、Fig.2は東京都都市計画地図情報システムによる最新のGIS (Geographic Information System)データ⁽¹⁵⁾を基に整理した都市構造の空隙率 ϕ の鉛直プロファイルである。東京都心のオフィス街である大手町付近、高層ビルの立ち並ぶ新宿副都心付近、さらに住宅地区である練馬付近についてデータを解析したものである。大手町付近の鉛直プロファイルは練馬付近のものと相似しているが、新宿付近の構造は両者と性格を異にした超高層型であることがわかる。このようにFig.1およびFig.2より都市内では、ローカルな地区の性質によって都市構造に相違があることがわかる。

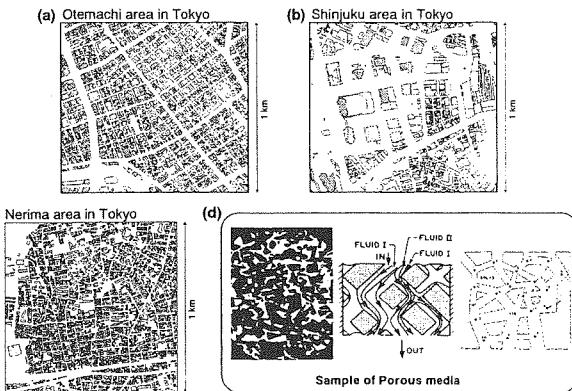


Fig.1 Samples of actual urban structure (Horizontal) (a), (b), (c); and porous media (d) (Sample of porous media is quoted from F. A. L. Dullien [7])

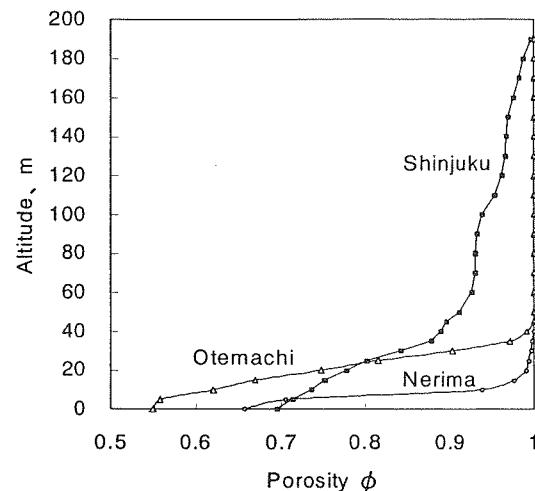


Fig.2 A schematic of the performance test equipment

2.2 モデリング

ここでは、都市温暖化を安定成層中の2次元自然対流問題に置き換えてモデルの定性的な検証を行なう。Fig.3およびFig.4に解析モデルと格子分割を示す。この解析モデルは、実際の都市構造にみられるような高層ビルを含む建物群の散在による空隙率の空間分布を想定しており、都市構造物の影響は3箇所にある加熱平板上の多孔質構造としてモデル化されている。

基礎方程式は、基本的に「多孔質流れモデル」において用いられるものである。多孔質内乱流のモデリングに関しては、現在も盛んに議論されている部分であるが^{(16),(17),(18)}、ここでは高津ら⁽¹⁶⁾および高津・増岡⁽¹⁷⁾による擬似渦・空隙寸法スケール渦の概念を導入した。この概念に基づくと、多孔質内の乱流流れにおいて、運動量あるいは熱輸送は基本的に空隙寸法スケールの渦混合および多孔質固体寸法スケールの擬似渦混合(多孔質固体まわりを迂回する流れの相互

干涉)によって行われていると解釈され、渦拡散係数を空隙渦および擬似渦の特性長さスケールで定義される渦拡散係数の代数和として表すことができるため、本解析のような拡散係数を固定したモデルの定性的な感度解析には都合が良い。このことが、高津・増岡モデルを採用した理由である。

さらに、圧力項を消去するために方程式系を渦度-速度系⁽¹⁹⁾に変換した。空隙内平均値に対する基礎方程式は Boussinesq 近似に基づき以下のように表される(記号は記号表参照)。

渦度方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + w \frac{\partial \omega}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi \frac{\sigma v_{x,v}}{K_x} u \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi \frac{\sigma v_{z,v}}{K_z} w \right) + Gr \frac{\partial \theta}{\partial x} \end{aligned} \quad (1)$$

エネルギー方程式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho c_p V_p} dI \quad (2)$$

渦度と速度の関係式:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = - \frac{\partial \omega}{\partial z}, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{\partial \omega}{\partial x} \quad (3)$$

ここで、(1)式の右辺第5、および第6項は空隙渦粘性による減衰項であり、修正係数 σ のオーダーは1とした。運動および熱の渦拡散係数 ν 、 κ は、水平方向で $100 \text{ m}^2/\text{s}$ 、鉛直方向で $10 \text{ m}^2/\text{s}$ と一定とした。さらに空隙粘性係数は擬似渦粘性係数の $1/10$ と仮定した。

$$K = c \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} d^2 \quad (4)$$

透過率 K は、一般的に(4)式で示されるが⁽²⁰⁾、都市構造における無次元係数 c のオーダーは現状では不明であるため、ここでは c のモデルへの感度解析を行って決めた。具体的には、計算結果による無次元対流高度が、後述の対流実験による無次元対流高度とほぼ等しくなるときの c を採用した。本モデルにおける c は 100 となった。なお、無次元対流高度とは鉛直方向の代表スケールで除した対流高度を示す。 d は多孔質を構成する立方体粒子の一辺の長さで、ここでは 10 m とした。また、(2)式の右辺第3項は、太陽日射による都市構造物

$$\begin{aligned} x = 0, \quad H_x &: \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ z = 0 &: u = w = 0, \quad T = T_s \text{ (at heated surface)}, \\ &\quad T = T_c \text{ (at opposite surface)} \\ z = H_z &: u = w = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

での発熱を加味した項であり、 I は全天日射量、 S_B は構造物表面積、 V_p は空隙体積で、 S_B および V_p は空隙率 ϕ の関数である。 α は太陽日射の吸収率で 0.7 と仮定した。境界条件は(5)式のように設定した。

格子分割は 100×100 とした。鉛直方向については地表面 ($z = 0 \text{ m}$) 付近で密な偏格子分割とした。一般に多孔質流れの数値解析では、境界壁面に沿う流体のみかけの流れが許されるが、本モデルでは地表面付近の空隙率は 0 に漸近するものとしており、地表面付近の鉛直方向の格子分割も密であるため、地表面における空間平均値としての速度成分は 0 に近似できるものとみなす。

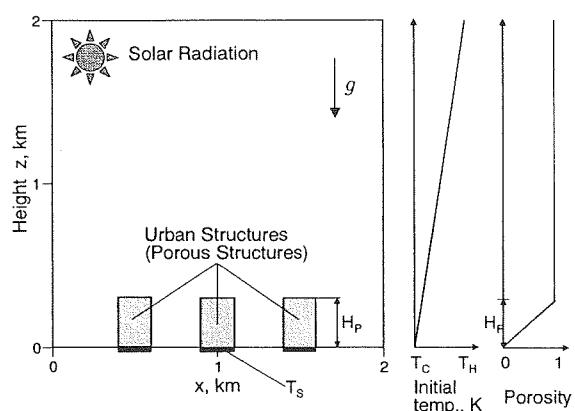


Fig.3 Two-dimensional simulation model and initial condition

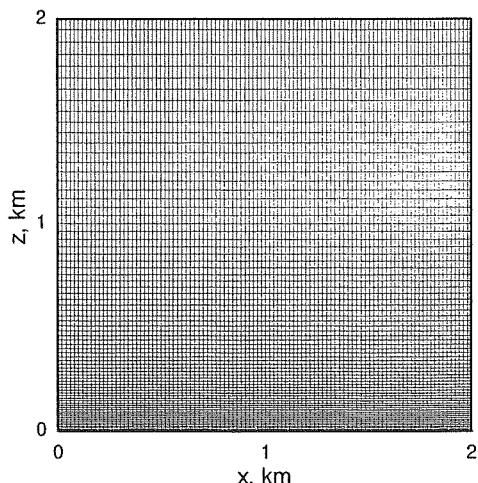
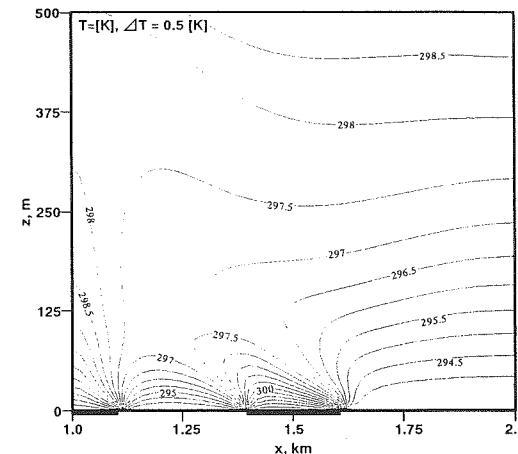


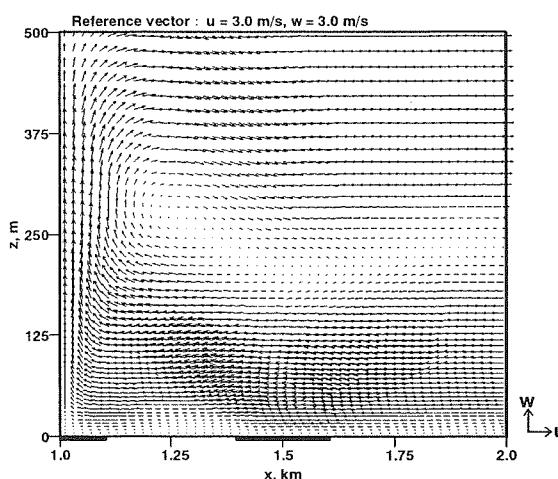
Fig.4 Numerical grid

Table 1 Conditions for the present simulations

Horizontal scale	H_x	2 km
Height of planetary boundary layer	H_z	2 km
High wall temperature	T_H	40 °C
Low wall temperature	T_C	20 °C
Local heating surface temperature	T_s	30 °C
Simulated time		2 hours
Order of Grashof number	Gr	10^8
Solar radiation	I	800 W/m²



(a) Isotherms



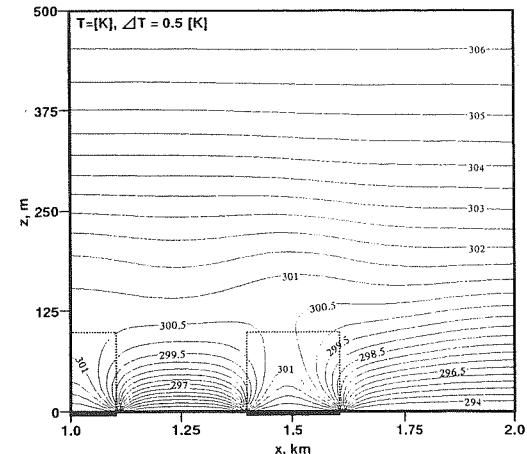
(b) Velocity vectors

Fig.5 Simulation results of isotherms and velocity vectors without urban structures

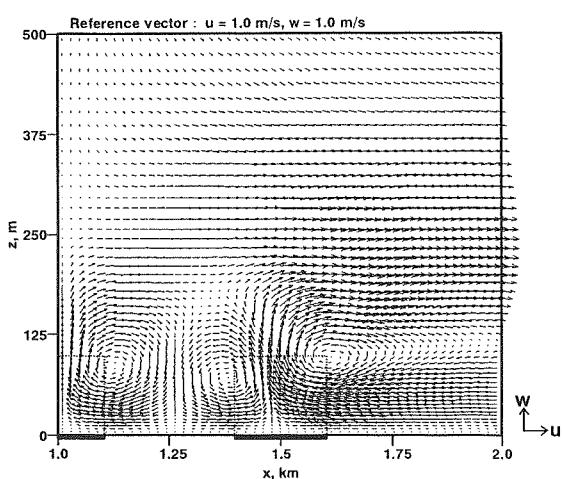
2.3 シミュレーション結果

Table 1にシミュレーション条件を示す。 $T_H = 40^\circ\text{C}$, $T_C = 20^\circ\text{C}$, 加熱平板および建物壁面温度 T_S を 30°C とし, 実時間にして2時間分の計算を行った。多孔質近似による都市構造の有無による結果への影響を明らかにするため, 構造物がない場合とある場合についてそれぞれシミュレーションを行った。

Fig.5(a),(b)は都市構造のない場合の気温分布と速度ベクトルの結果で, これに対してFig.6(a),(b)が都市構造のある場合の結果である。なお, 結果の図は見易さを考えて鉛直方向ならびに水平方向ともに重要な部分を拡大してある。また, 速度ベクトル表示の凡例もFig.5とFig.6では大きさが異なる。これらを比較すると, 都市構造がない場合, 対流ブルームは, 3箇所ある加熱面のうち, 中央の面の上空においてのみ卓越する傾向がある。対流高度の上限もほぼ 1 kmに近い。これに対して, 多孔質近似による都市構造がある場合で



(a) Isotherms



(b) Velocity vectors

Fig.6 Simulation results of isotherms and velocity vectors with urban structures

は, 各加熱面上にそれぞれ渦対が発生し, 計4個の渦が高度300m以下の低層で形成されている。

また, このときの温度分布を比較すると, 都市構造がある場合, 渦対の発生する下層では, 約 5°C も都市構造がない場合にくらべて温度が高くなっている。

都市構造がある場合には, 太陽日射による加熱効果と空隙渦粘性による水平方向への速度減衰作用が働くため, 微細な渦対が都市構造上空において発生し, 結果的に地表付近の温度上昇が引き起こされるものと考えられる。このことは都市の接地境界層の空隙率の低下, 言い換えれば過密化の進展が, 局所的な気温の上昇につながる可能性を示唆しているものとみられる。

3. 都市境界層を模擬した対流実験

前節において, 多孔質流れを採用した本モデリングに基づく数値シミュレーションによって都市構造の影響を

明らかにしたが、モデリングにおいては、不明瞭なパラメータ等もあり、モデリングおよびシミュレーション結果の妥当性を確認するためには実験的検証が必要である。そこで、数値シミュレーションの解析モデルに対応させて、安定成層場中の2次元自然対流の可視化実験を行った。都市温暖化を対象とした自然対流実験については、Noto and Okamoto⁽²¹⁾による報告がある。彼らは、都市温暖化現象を安定成層場中の加熱細線周りの流れに簡略化し、その対流特性を検証している。本研究では、都市構造模型を設置した加熱平板を都市の市街地として模擬することにする。

3.1 実験モデルと装置

実験モデルをFig.7(a),(b)に、実験装置の模式図をFig.8に示す。試験流体は空気で、幅650 mm×高さ400 mm×奥行き250 mmのアクリル製の密閉容器の内部に安定温度成層が形成される。温度成層の安定度 St は、鉛直方向の温度勾配によって定義される。密閉容器の天井面および底面には、それぞれ厚さ5 mmおよび3 mmの銅板を用い、天井面の外側にヒーティングケーブル、底面の外側には幅50 mm×奥行き250 mmのラバーヒータを設置し、PID制御(比例積分微分割御)付きの温度調節器によって一定の温度を保つようにした。容器内部および加熱・冷却面の温度は、直径0.3 mmの銅一コンスタンタン熱電対を用いて計測した。

3.2 流れの可視化方法

流れの可視化方法として、注入流脈法の1つである煙法⁽²²⁾を用いた。気流の場合、流脈を観察するためのトレーサーとしては、煙が適している。煙は極微細な粒子の集団であり、気流によく追随する。煙粒子の大きさは小さければ小さいほど気流への追従性が良い。たばこ、および線香の煙は粒径が小さく、しかも大きさが揃っているので、低速気流の精密な観察に適している。本研究では、線香の煙を用いた。Fig.8に示すように、容器の横面に幅15 mmのスリットを設け、光源であるスライドプロジェクターの光を入射して煙を照射し、正面からカメラで撮影した。

3.3 実験の手順

実験装置は気流のない暗室に設置され、室温、湿度および気圧の変化のない状態で実験を行った。まず、温度調節器を稼働させ、安定成層の安定度が目標の値に達する少し手前の時点で、線香の煙を容器横面の煙吹き出し口から静かに入れ、安定度および煙の状態が実験に適した状態になるまで待つ。このとき煙の温度が安定成層の温度より高くならないようにし、煙が底面の加熱面の上部に自然に引き込まれるように注意を払った。

次に、底面の加熱面のヒータを稼働させ、目標の温度に

調節する。断続的に可視化のためのスリットに光源を入射させて、流れを監視し、流れがほぼ定常状態になったと判断される時点で撮影を行った。

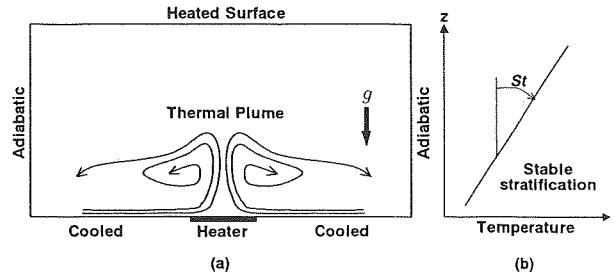


Fig.7 (a) Schematic diagram of the experimental model
(b) Stable stratification in an enclosure

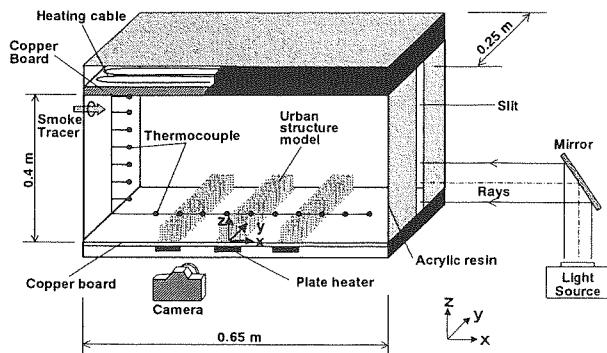


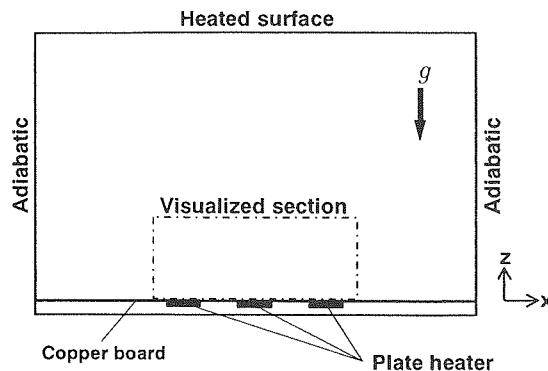
Fig.8 Experimental apparatus for simplified urban structures in thermally stable stratified air

3.4 実験結果

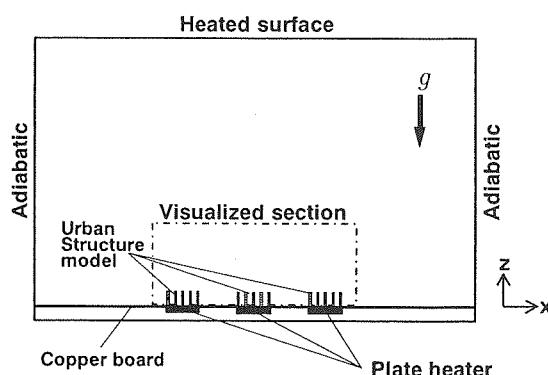
実験は、前節に示した数値シミュレーションの解析モデル(Fig.3)に対応させるために、底面中央に3つの加熱面を設け、Fig.9(I),(II)に示すように都市構造模型がある場合と無い場合について行った。都市構造模型はアクリル製であり、Fig.10に示すように配列した。都市構造模型における1つの建物の寸法スケールは、実験の鉛直方向のスケールからみて面積20 m×20 m、高さ130 m程度の建物に相当する。また、数値シミュレーションおよび実験のGrashof数 Gr は、およそ 10^8 のオーダーに設定している。さらに温度成層の安定度 St はいずれの実験も0.2 K/cmに設定した。Table 2にその他の実験条件を示す。

安定温度成層場中のサーマルプルームは温度成層の影響を強く受けて、あたかも上から蓋をかぶせたような、いわゆるフューミゲーション(Fumigation)状態になる。このような対流特性が都市温暖化や大気汚染拡散問題とも関連している。

Fig.11およびFig.12は、それぞれFig.9(I)および(II)に対応した対流可視化結果である。都市構造模型がある場合とない場合では顕著な差異が認められる。ない場合ではプルームは中央の加熱面上においてのみ卓越する。



(I) Three local heating surfaces are placed at the bottom surface in the enclosure at regular intervals



(II) Three local heating surfaces with modules of simplified urban structures were placed at the bottom surface in the enclosure at regular intervals

Fig.9 Schematic diagrams of experimental conditions

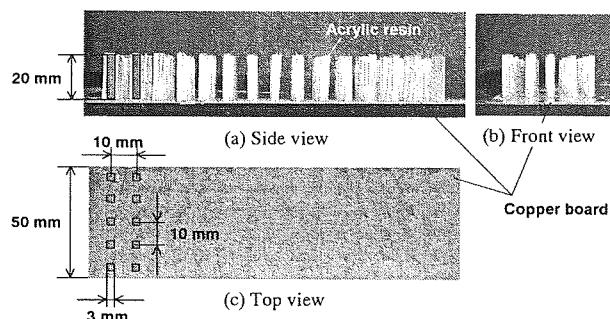


Fig.10 Simplified urban structure model

Table 2 Conditions for the present experiments

Temperature stratification measure	St	0.2 K/cm
High wall temperature	T_H	60.0 °C
Low wall temperature	T_C	26.0 °C
Local heating surface temperature	T_s	28.5 °C
Order of Grashof number	Gr	10^8

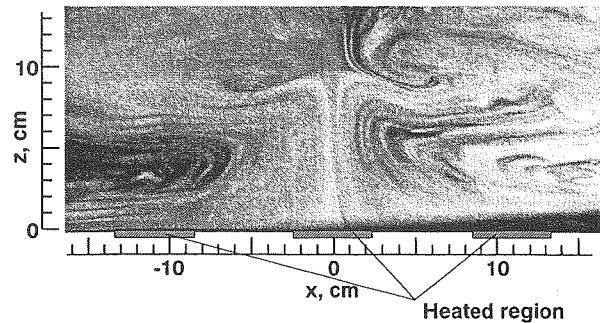


Fig.11 Thermal plume for the condition (I)

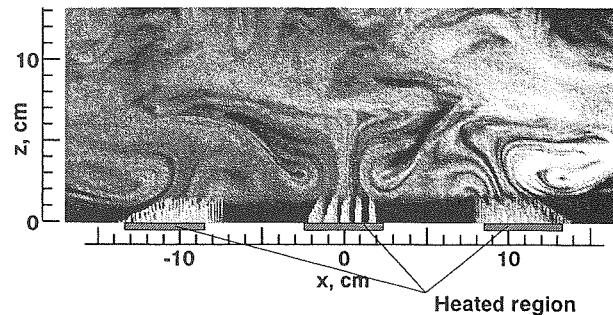


Fig.12 Thermal plume for the condition (II)

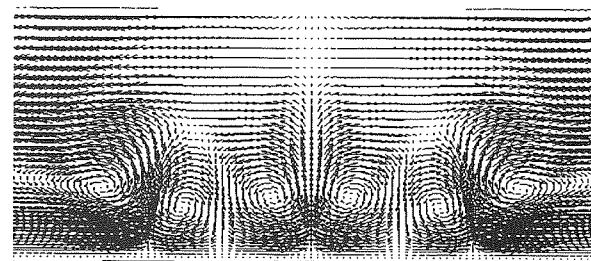


Fig.13 Comparison between numerical result and experimental result

一方、都市構造模型のある場合は、それぞれの加熱面上に一対ずつ、計3対の渦対が形成されている。また、都市構造模型のない場合に比べて、低い高度でフューミゲーションが起こっていることがわかる。

このような現象が生じる原因は、都市構造模型による水平方向の速度減衰効果と建物面積分の加熱面が増加した効果が考えられる。また、これらの実験結果は数値シミュレーションの結果(Fig.5, Fig.6)と比較すると傾向が良く一致していることがわかる。

数値シミュレーションでは、一様な壁面温度 T_s が加熱平板上に適用されており、さらに都市構造物に対しては、太陽日射による構造物の温度上昇が考慮されている。これらによる加熱効果は、シミュレーション条件である空隙率の鉛直方向への増加に伴って減少する。

一方、実験では、都市構造物の鉛直方向への空隙率の

増加はない。そこで、熱伝導率の比較的低いアクリル製の構造物模型を用いることによって、構造物の下部では加熱面温度 T_s にほぼ等しい温度となり、上部では、周囲の空気温度とほぼ等しくなるという鉛直分布が形成される。したがって、シミュレーション条件による加熱効果とほぼ同等の効果が実験においても成立しているものと考えられる。

4. 結 言

本論文では、構造物等の影響を含む都市温暖化の新たなモデリングについて提案し、数値シミュレーションおよび対流実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 都市構造物の林立する都市の接地境界層(都市キャノピー層)を特殊な性質を有する「多孔質構造」とみなすことによって、「多孔質流れモデル」を都市温暖化のモデリングに適用することを提案した。
- 2) 新たなモデリングを用いて、都市温暖化を安定温度成層場中の自然対流熱伝達問題と置き換えて2次元数値シミュレーションを行って、モデリングの妥当性を検証した。
- 3) シミュレーション結果では、都市構造に微視スケールの起伏がある場合、都市接地境界層の低層において、従来の都市温暖化スケールよりも規模の小さい複数の渦対が発生することが明らかになった。
- 4) 都市接地境界層を模擬した対流実験を行った結果は、数値シミュレーションの結果と良好な一致を示し、本モデリングの妥当性を明らかにした。

記号表

c	: 無次元定数	u, w	: x, z 方向の速度
c_p	: 比熱	V_p	: 空隙体積
d	: 多孔質内粒子直径	x, y, z	: 軸
Gr	: グラスホフ数 $= g\beta(T_h - T_c)H_z^3/\nu^2$	α	: 太陽光吸収率
g	: 重力加速度	β	: 体膨張係数
H_p	: 都市建造物高さ	ρ	: 密度
H_x	: 水平方向スケール	σ	: 修正係数
H_z	: 鉛直方向スケール	ϕ	: 空隙率
K	: 透過率	κ_x	: 水平方向熱拡散係数
S_B	: 構造物表面積	κ_z	: 鉛直方向熱拡散係数
St	: 大気安定度= dT/dz	ν	: 代表拡散係数
t	: 時間	ν_x	: 水平方向拡散係数
T	: 温度	ν_z	: 鉛直方向拡散係数
T_c	: 低温壁温度	$\nu_{x, v}$: 水平空隙渦粘性係数
T_h	: 高温壁温度	$\nu_{z, v}$: 鉛直空隙渦粘性係数
T_s	: 加熱面温度	ω	: 渦度

参考文献

- (1) 斎藤武雄, “地球と都市の温暖化－人類は地球を救えるか？－,” 森北出版 (1992).
- (2) 斎藤武雄, “ヒートアイランド,” 講談社 (1997).
- (3) Saitoh, T. S. and Endo, K., “Three-dimensional Simulation of Urban Heat Island,” Transactions of JSME, Vol.49, No.445 (1983), pp.2035-2040.
- (4) Saitoh, T. S. and Fukuda, K., “Three-dimensional Simulation of Urban Heat Island,” Bulletin of JSME, Vol.28 (1985), pp.101-107.
- (5) 斎藤武雄・千葉秀樹, “都市大気における汚染物質および道路粉じんの3次元挙動とヒートアイランド,” 天気, Vol.34, No.3 (1987), pp.63-72.
- (6) Saitoh, T. S., Shimada T. and Hoshi, H., “Modeling and Simulation of the Tokyo Urban Heat Island,” Atmospheric Environment, Vol.30, No.20, pp.3431-3442 (1996).
- (7) 斎藤武雄, “都市温暖化の現状,” 日本機械学会誌, Vol.94, No.869 (1991), pp.11-15.
- (8) 斎藤武雄, “都市温暖化から見た未来の東京,” 日本太陽エネルギー学会誌, Vol.18, No.4 (1992), pp.10-19.
- (9) 斎藤武雄, “地球温暖化時代の都市とエネルギー,” 日本機械学会誌, Vol.95, No.878 (1992), pp.33-39.
- (10) 斎藤武雄, “温暖化時代の空調・冷凍技術,” 冷凍, Vol.68, No.783 (1993), pp.20-25.
- (11) 斎藤武雄, “地球と都市の温暖化シミュレーション,” 日本機械学会誌, Vol.98, No.920 (1995), pp.29-32.
- (12) 斎藤武雄, “都市温暖化と大気汚染の改善のためのマスター・プラン,” 冷凍, Vol.72, No.836 (1997), pp.26-32.
- (13) 斎藤武雄・山田昇, “都市温暖化と快適性評価に関する研究,” 日本機械学会論文集(B編), 63巻609号 (1997), pp.295-302.
- (14) 斎藤武雄, “ヒートアイランドの現状と課題,” エネルギー・資源, Vol.22, No.4 (2001), pp.18-22.
- (15) 東京都都市計画地図情報システムによる平成8年度のデータ提供 (1998).
- (16) 高津康幸・増岡隆士, 鶴田隆治, “多孔質内乱流に関する一考察,” 日本機械学会論文集(B編), 60巻571号 (1994), pp.965-970.
- (17) 高津康幸・増岡隆士, “多孔質内の乱れの生成と散逸,” 第35回伝熱シンポジウム講演論文集 (1998), pp.303-304.
- (18) 桑原不二朗, 中山頭, 青木俊直, “多孔質体内乱流のモデリングに関する一考察,” 第35回伝熱シンポジウム講演論文集 (1998), pp.301-302.
- (19) 保原充・大宮司久明, 「数値流体力学－基礎と応用」, 東京大学出版会(1992).
- (20) F.A.L. Dullien, “Porous Media Fluid transport and Pore Structure,” Academic Press, 1979.
- (21) Noto, K. and Okamoto, H., “Thermal Plume from a Heat Source in Thermally Stable Stratified Air: Fundamental Characteristics of Heat Island Phenomenon,” Urban Climate, Planning and Building, Elsevier Sequoia, vol.1 (1991), pp.183-190.
- (22) 浅沼強, “流れの可視化ハンドブック,” 朝倉書店 (1977).