

市街地スケール都市気象モデルによる風・熱環境評価の検討

Numerical model of urban meteorology for single district scale

藤野 毅*・浅枝 隆**・中北 英一***

by Takeshi FUJINO, Takashi ASaeda and Eiichi NAKAKITA

ABSTRACT; A numerical model which calculates air temperature and wind distributions within single districts of a few square kilometers, was developed by adding the effect of urban building canopies to the previous model. The micro-climate characteristics above and below the canopy were depicted in detail for each of these canopy conditions. In comparison to the roughness parameter treatment of the existing meso-scale model, the urban canopy numerical model achieved more realistic distributions.

key words: Numerical model, Urban planning, Water front, Wind road

1. はじめに

これまでの都市気象を評価するモデルの特性として、まずメソスケールのモデルでは、1つの街区内の複雑な構造物や植生などの分布を粗度で代表させる場合が多く、また、キャニオン内の放射や植生など、局地的な影響を評価するモデルでは、現象を厳密に再現するものの、計算機の処理能力の限界により周辺地域から受ける影響は無視せざるを得ないのが現状である。ところが、都市計画の上で対象とされる領域は、一戸の建物よりも大きく都市全体の面積よりも小さい、1つの街区程度である場合が多い。従って、実際に必要とされるモデルは、メソスケールの気象モデルの特性を備え、建物や植生によって形成されるキャノピー内の放射特性や大気の流れに与える影響を含み、しかも短時間で計算可能であることが望まれる。例えば、ウォーターフロントの都市の熱環境は、とりわけ通りの風通しの度合によっても大きく異なることが予想される。そこで本研究は、街区スケールの熱環境予測に適用するためのモデルを開発し、これを実際の街区に適用させて現状の再現を試みた。さらに、通りによる“風の道”という観点から、ウォーターフロントの都市における熱環境評価について考察した。

* 学生員 工修 埼玉大学大学院

(〒338 浦和市下大久保 255)

** 正会員 工博 埼玉大学助教授 理工学研究科 環境制御工学専攻

*** 正会員 工博 京都大学防災研究所 水資源研究センター

(〒611 宇治市五ヶ庄)

2. 都市キャノピーモデルの概要

2.1 基礎方程式

都市キャノピー層内外の風の評価は、正確にはキャノピー内の大気の流れを再現することによって得られる。しかし、複雑なキャノピー構造を再現することは膨大な計算時間を費やす割にはキャノピー周辺の大気環境の評価にそれほど大きな改善をもたらさない。従って、市街地スケールを対象とした平均風速の計算においては、簡単のため運動方程式中に建物や植生による抵抗項を加えることによって表現した。

大気の運動方程式：

$$\frac{DU}{Dt} = fV - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - C_d U |U| + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{uw}) \quad (1)$$

$$\frac{DV}{Dt} = -fU - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - C_d V |V| + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{vw}) \quad (2)$$

$$\text{但し、} \frac{DQ}{Dt} \equiv \frac{\partial Q}{\partial t} + U \frac{\partial Q}{\partial x} + V \frac{\partial Q}{\partial y} + W \frac{\partial Q}{\partial z}$$

連続式：

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ここで、 U, V, W は x, y, z 方向の風速成分、 f ：コリオリパラメーター、 P ：圧力の平均値、 C_d ：抵抗係数、 ρ ：空気密度、 K_x, K_{xy}, K_y ：水平方向の拡散係数、 $-\overline{uw}, -\overline{vw}$ ：乱流フラックスを示す。

ビルキャノピーの抵抗係数は、粗度密度（建物の単位体積当りに示す割合）と風速の関係式（丸山と石崎, 1987）を用いた。

$$C_d = (164\rho_r + 16)U_*/U \quad (4)$$

ここで、 ρ_r ：粗度密度、 U_* ：摩擦速度を示す。

一方、乱流エネルギーは、物体の抵抗による平均風速の変化にともない増加する。方程式は空間平均とアンサンブル平均が同じであるものと仮定し（Yamada(1981)）、通常の乱流方程式に抵抗による乱れの生成項が付加された形で表される。

$$\begin{aligned} \frac{Dq^2}{Dt} = & -\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial q^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial q^2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(q l S_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) \\ & + \beta g \overline{w \theta_v} - \frac{q^3}{B_1 l} + C_d [|U|^3 + |V|^3] \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $q^2 = \overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}$ ：乱流エネルギーの2倍、 q ：乱流エネルギーの平方根、 l ：渦長さ、 B_1, S_q ：経験定数を示す（それぞれ0.2, 15）。

気温の算定には平均温度の乱流方程式により見積もった。

$$\frac{D\Theta}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{\theta w}) \quad (6)$$

ここで、 Θ ：温位、 $-\overline{\theta w}$ ：熱フラックスを示す。

最後に、各乱流フラックスの算定は、Yamada(1974)のレベル2を用いた。

$$(-\overline{uw}, -\overline{vw}) = l q \tilde{S}_M \left[\frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial V}{\partial z} \right] \quad (7)$$

$$-\overline{\theta w} = l q \tilde{S}_H \frac{\partial \Theta}{\partial z} \quad (8)$$

ここで、 $\tilde{S}_M$ および $\tilde{S}_H$ は安定関数をそれぞれ示す。

2.2 キャノピー内の放射特性と境界条件

次に、キャノピーの熱特性を捉えるために、ビル表面(および地表面)の温度を算定した。算定式はビル表面の熱収支式と、鉛直1次元熱伝導方程式を用いた。ここで、壁面の熱収支式の正味放射は、周囲のビルの壁面、及び道路表面からの多重反射の効果を考慮した形を用いた。以下にこれらを示す。

ビル表面の熱収支式：

$$-\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial z_c} = R_{Nc} + H_c \quad (9)$$

ビル壁面に対する鉛直1次元熱伝導方程式：

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\lambda_c}{\rho C_c} \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \quad (10)$$

ここで、 z は表面から鉛直下向きを正とする。 T_c ：ビル壁面内の温度、 R_{Nc} ：壁面で受ける正味放射、 H_c ：壁面からの顕熱、 λ_c ：壁面内の熱伝導率、 ρC_c ：壁面内の熱容量を示す。

正味放射の算定式：

$$R_{Nc} = (S + s\psi_{sky \rightarrow A})(1 - \alpha_A) + R_a\psi_{sky \rightarrow A} + \sum_i (S_i + s_i\psi_{sky \rightarrow i})\alpha_i\psi_{i \rightarrow A} + \sum_i R_i\psi_{i \rightarrow A} - \varepsilon\sigma T_c^{4A} \quad (11)$$

ここで、 S, s はそれぞれ日射の直達および散乱光成分、 $\psi_{sky \rightarrow A}$ ：点 A からの天空率、 α_A ：点 A での表面のアルベド、 R_a ：空からの大気放射、 S_i, s_i ：表面要素 i からの日射の直達および散乱光成分、 α_i ：表面要素 i でのアルベド、 $\psi_{i \rightarrow A}$ ：点 A から表面要素 i の見込み角、 R_i ：要素 i からの赤外放射量、 ε ：表面の輝度、 σ ：ステファンボルツマン定数を示す。

3. 具体的な条件下での計算

計算は、ウォーターフロントと呼ぶにふさわしい滋賀県の琵琶湖半に位置する長浜市市街地(35.22N, 136.18E)を対象に行った。計算領域は、長浜駅を中心とする縦横4250m×6250mとし、これを250mメッシュで分割した(図-1)。鉛直方向には高さ3000mまで不当間隔15層に分けた。ここで、道路を遡上する“風の道”について考えるために、メインストリートである駅前通りを中心とする縦横265m×390mの領域をさらに16分の1(15.6m)のメッシュに分割した(図-2)。ここで、駅前通りの幅は約20mである。計算では、領域内の建物の平均高さ、および1メッシュ当りに占める建物の割合を考慮した。ここでは、全建物の90%以上が木造2階建てであるため、高さは7mとし、建物の割合は住宅配置図(図-2)より目測で0から100%まで5段階に分けた。

まず始めに、モデルの整合性を確認するために、95年10月23日から26日に行われた現地観測の結果と比較し、現状の再現を行った。観測項目は、日射、アルベド、大気放射、放射収支、気温(全10点)、風向・風速(全5点)、道路温度、屋根面温度、壁面温度である。次に、駅前通りの幅が3倍に広がった場合を想定した計算を行い、通りの風・熱環境の評価を試みた。

4. 計算結果

4-1 風速分布

モデルによるキャノピー内外の風の再現性を確認するために、まず長浜市より20kmほど北に位置する木之本町の水田地帯にて同期間中ゾンデにより測定された風速分布を計算領域全体の平均風速場として取り扱った。図-3に、水田と都市域における、高さ50mまでの風速分布の計算結果を示す。ここで、水田での風速分布は地表面粗度($z_0=1\text{cm}$)のみを与えて得られたものである。これより市街地では、建物の抵抗によりキャノピー層内の風速が大きく落ちており、その影響でキャノピー外の風速も弱くなっている。

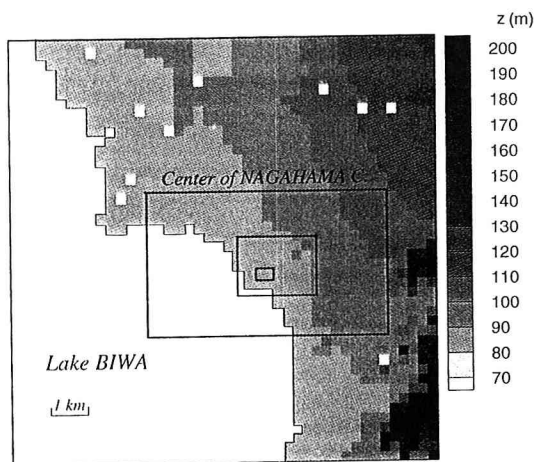


図-1 計算領域(枠内250m, 62.5m, 15.6mメッシュ)



図-2 15.6mメッシュ内の土地利用分布図

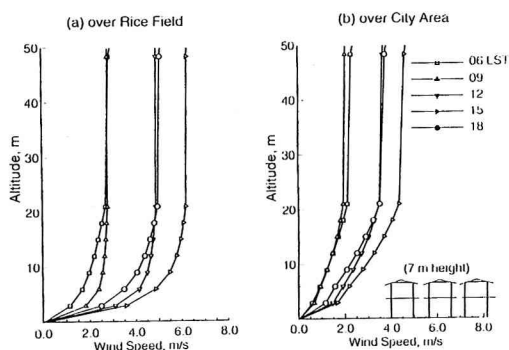


図-3 風速のプロファイル(計算値)

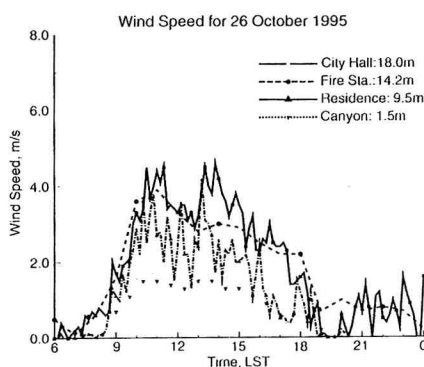


図-4 風速の時間変化(観測値)

ここで、図-4に、市街地内の各地点で測定された風速の時間変化を示す。図は10分間の平均値を示す。この変動は大きいものの、各高さでの値と計算値は平均的には合っており、市街地キャノピー内外の風速分布が再現されたといえる。

4-2 壁面・屋根面温度

次に、15時の建物の屋根面及び壁面温度の分布を図-5から7に示す。まず屋根面では、その角度や凸凹については考慮していないため、どの屋根もほぼ様な値が得られた。しかし壁面では、ある程度分布を持っており、建物の密度が高いほど温度は低くなっている。これは、そこでは同じ向きでも壁面に到達する日射量が少ないためであり、分布の傾向は理に叶っていると言えよう。ここで、図-8に、建物の屋根面温度および壁面温度の観測値を示す。現地の屋根はほとんどが瓦で、色が多彩であった。しかしそれぞれの値のばらつきは小さく、計算値は実際の分布に近いものと推測される。一方、壁面温度では、素材が多岐にわたるため代表値を算定するのは難しいが、北と南では大きな差があり、計算値も同様な傾向を示している。

4-3 地上気温・風速分布

図-9、10に、15時の地上気温・風速分布を示す。まず、計算領域全体の計算結果は、湖面上から陸地に向かって6m/s程度の強い風が吹いている。気温は、内陸に行くほど内部境界層が発達して、気温が高くなる様子が得られた。次に、着目した街区スケール内では、全体として風速がかなり落ちている。それでも風上の駅前広場で最も風速が大きく、民家の密集した地域では最も小さい。この場合の駅前通りの風は、決して

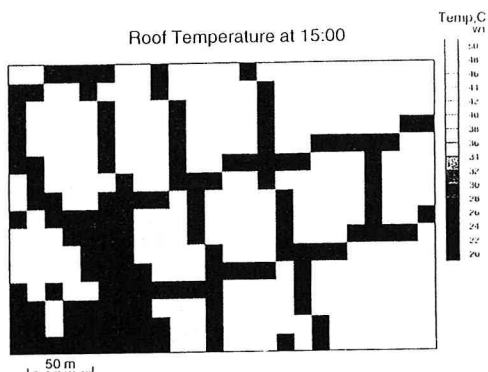


図-5 屋根面温度の分布(15:00)

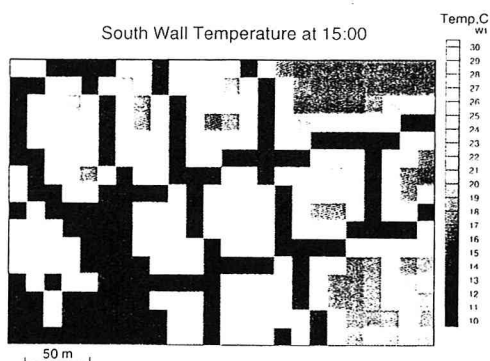


図-6 壁面温度の分布(南向き、15:00)

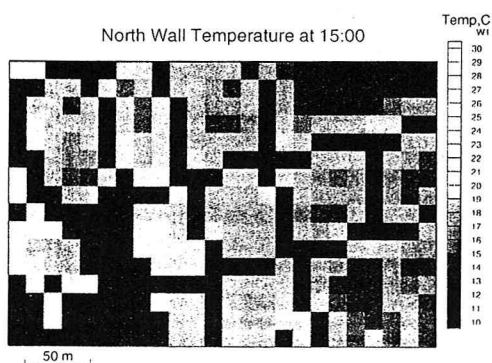


図-7 壁面温度の分布(北向き、15:00)

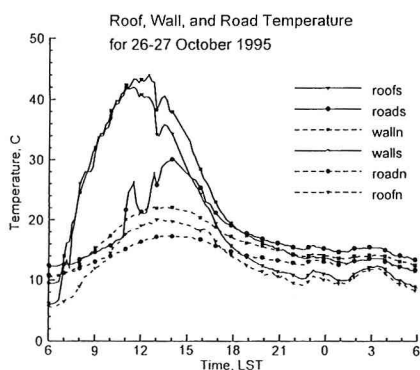


図-8 屋根・壁・地表面温度の日変化分布(観測値)

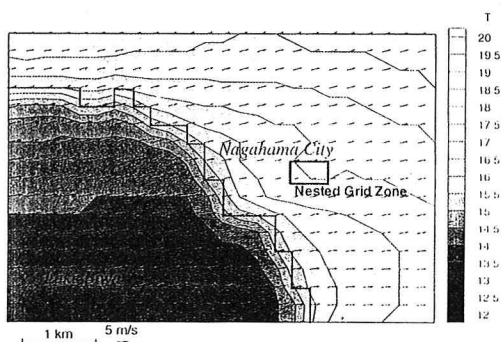


図-9 気温・風ベクトルの計算値(15:00)

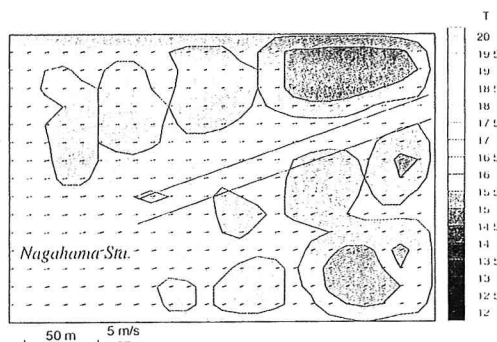


図-10 気温・風ベクトルの計算値(街区内、15:00)

大きいものとは言えず、“風の道”としての役割は小さい。次に、気温をみると、大きな温度差は確認できないが、駅前通り上でやや高く、密集した民家では低い傾向が現れた。この差は、先にも触れたように建物の密集度の違いによる日射量の到達度の違いに起因している。ここで、図-11に、各地点に置ける気温の日変化を示す。観測値は、それぞれの局所的な影響を受けながらも、値のばらつきは小さかったことが分かる。これより、建物の密集度が大きく異ならない限り、街区内の気温分布は一様に近く、計算も再現している。

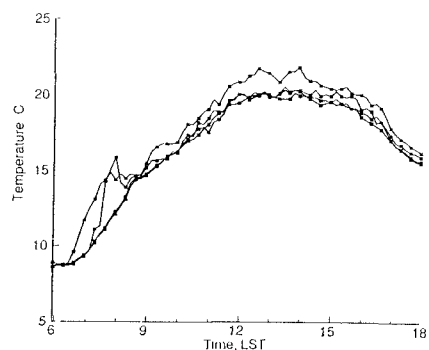


図-11 気温の日変化(4地点)

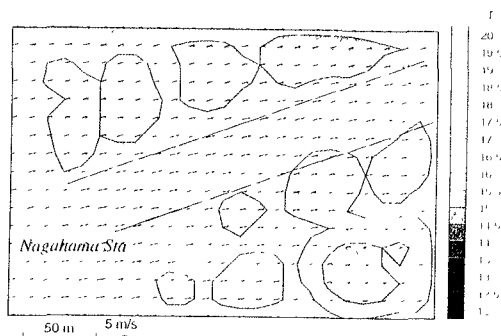


図-12 気温・風ベクトルの計算値(道を広げた場合15:00)

最後に、図-12に駅前通りを広げた場合の気温・風ベクトルの分布を示す。現状と比べると、若干風速が増加していることが確認できる。しかしながら、気温分布はほとんど変わらなかった。これは、時期的に日射量が少ないせいかもしれない。また、風速の水平勾配も小さいが、これはまだメッシュが荒いせいかもしれない。これらの定量化に関する問題は、諸パラメーターに依存するので、色々なケースで計算を行う必要がある。しかしながら、これらの諸問題が解決すれば、本モデルは環境評価に十分用いられるといえよう。

4. おわりに

従来からの大気モデルの手法にビルキャノピーの影響等を組み込んだ都市域の風、気温の解析モデルを作成した。結果は概ね合理的なものが得られた。本モデルは、これまで最も困難とされてきた100m-数km程度のスケールの住宅地域、市街地の熱環境の予測に適していると思われる。ここで、本解析に用いた観測値は95琵琶湖プロジェクトによって得られている。長浜市の住宅配置図は市役所の藤居さんより、また高層気象データは同プロジェクトにおける気象協会関西支部の友村さんより頂いた。観測に全面的に協力して頂いた都立大の浜田崇・田中博春両氏、長浜市役所財務課及び長浜消防署の皆さん、そして自宅の屋上を貸して下さった杉田弘夫さんに深く感謝いたします。

参考文献

- 1)丸山敬・石崎澁雄(1989):市街地キャノピー内の時空間平均風速の鉛直分布に関する験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 394, pp.60-65.
- 2)Lettau H.(1969): Note on aerodynamic roughness parameter estimation on the basis of roughness element description, J. Appl. Meteor, 8, pp.822-832.
- 3)Mellor, G.L. and Yamada, T.(1974): A hierarchy of turbulent closure models or planetary boundary layers, J. Atmos. Sci., 31, pp.1791-1806.
- 4)Yamada, T(1981): A Numerical Model Study of Turblent Airflow in and Above a Forest Canopy. J. of the Meteor. Soc. of Japan, 60, pp.439-454.
- 5)Panofsky, H. A.(1963): Determination of stress from wind and temperature measurements, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 23, pp.495-502.
- 6)Uchijima Z.(1961): Bull. Nat. Inst. Agric. Sci., A, pp.243-263.
- 7)Vukovich F. M., J. W. Dunn III and B. W. Crissman (1976): A theoretical study of the St. Lois Heat Island:the wind and temperature distributions, J. Appl. Meteor, 15, pp.417-440.