キャノピー内外における都市キャノピーモデルの再現性に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON THE VALIDITY OF URBAN CANOPY MODEL IN AND ABOVE THE CANOPY LAYER

萩島 理*, 谷本 潤**, 片山 忠久***

Aya HAGISHIMA, Jun TANIMOTO and Tadahisa KATAYAMA

The *Urban Canopy Model* that has been widely used as a practical methodology to estimate a friction force generated by a bulk of building roughness, was precisely confirmed from the validation viewpoint. In three series of experiments, both disposition and height of building models were particularly concerned. In short, following three schemes for the models were intrigued;

- Arrayed in both staggered and normal rectangular block consisting of same height models
- Arrayed in both staggered and normal rectangular block consisting of models combined two heights
- Random shaped model derived from a certain real city

With respect to the space-averaged vertical wind profiles, good agreement between the experiments and calculations was obtained in any cases. That led to verify the fact that the *Urban Canopy Model* was deemed as one of the most effective procedures to predict the wind characteristics in urban canopy layer.

Keywords : canopy model, vertical wind profile, wind tunnel experiment

キャノピーモデル、風速プロファイル、風洞実験

1. はじめに

都市を吹き抜ける風は、自動車排ガス等の汚染物質を希釈・拡散するのみならず、高温化しつつある夏季の屋外環境に涼をもたらし、室内の通風量を増加させるなど、熱環境の面でも様々な効果が期待される。そのため、近年では、夏季の空調負荷低減や屋外温熱快適性向上の観点から、都市の風環境については適度な「風通し」を確保するのが望ましいという考え方が一般的になってきている。しかし、建物の高層化、高密度化が進む現状では、都市の風は年々弱まる傾向にある。

このような背景から、「風通しの良いまちづくり」が地方自治体のエコシティ構想の一翼として推進されつつある。「風通しの良いまちづくり」のための都市計画・建築設計の具体的指針を得るためには、複雑形状の建物群が集積する実在都市の「風通し」の定量的評価、即ち街区風速の予測が望まれる。建物周辺気流の予測手法として、コンピュータによる乱流数値計算に関する研究は多数行われており¹⁾、設計時の環境アセスメントのツールとしても一般化しつつある²⁾。しかし、都市広域を対象として、個々の建物の形状を解像できる細かい格子分割による乱流数値計算を行う事は、コンピュータの性能が飛躍的に高まった現在においても莫大な計算負荷を要する。

これに対して、キャノピーモデルは、運動量輸送方程式に粗度体積密度と抗力項を組み込むことで、複雑形状の市街地における空間平均

風速を粗い差分格子を用いても得ることが出来る手法³⁾⁴⁾であり、都市の風通しの有効な評価ツールとして期待される。キャノピーモデル中に含まれる実験定数であるラフネスパラメーターについては、千鳥配列の立方体模型群の床面抗力に関する風洞実験⁵⁾に基づき、丸山により粗度体積密度との関係が明らかにされている⁶⁾。また、このラフネスパラメータを用いたキャノピーモデルの計算結果が市街地形状模型上空の鉛直風速分布を精度良く予測できる事も確認されている⁷⁾。

「都市の風通し」、即ち夏季の暑熱緩和効果や室内通風量の増加による空調時間の短縮効果等の定量的予測を目的としてキャノピーモデルを用いる場合、キャノピー上空のみならず、人間の主たる生活空間であるキャノピー内、特に地表付近における空間平均風速の予測精度がある程度保証されている事が望ましい。しかし、キャノピー高さ以下の空間においては、キャノピーモデルの再現性については十分に検証されていないのが現状である。

以上の背景から、本稿では、キャノピーモデルを都市の風通し評価のツールとして位置づけ以下の検討を行う。まず、様々な模型配列における風洞実験を行い、模型周辺の3次元的气流分布の測定値から空間平均風速の鉛直分布を求める。次に、風洞実験を再現したキャノピーモデルによる数値計算を行い、実験値との比較を行う。以上により、キャノピー内外におけるキャノピーモデルの再現性の確認を行う。特

* 九州大学大学院総合理工学研究院 助手・工修

** 九州大学大学院総合理工学研究院 助教授・工博

*** 九州大学大学院総合理工学研究院 教授・工博

Research Assoc., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., M. Eng.

Assoc. Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.

Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.

に、キャノピーモデル検証の対象としては、同一サイズ直方体模型の千鳥配列、整形配列のみならず、実在都市への適用を想定して、高さの異なる直方体模型が交互に並ぶ場合、実在市街地の縮小模型の場合についても取り上げる。

2. キャノピーモデルの概要

2-1 基礎式

ヴタン⁹⁾からによるキャノピーモデルの基礎式⁹⁾を表1に示す^{注1)}。粗度形状を表現するパラメータは、粗度表面積密度 a_s と流体体積密度 G の2つで、粗度の影響は各輸送方程式中の抗力項 F_u 、 F_k 、 F_ε により考慮されている。粗度表面積密度 a_s は単位流体体積当たりの粗度表面積、流体体積密度 G は単位空間体積当たりに流体が占める体積の割合である。直方体粗度が整然と千鳥または整形に配列されている場合、粗度表面積密度及び流体体積密度は次式で表される。尚、(11)式に含まれる粗度表面積は{粗度要素の壁面積/4}で定義され、千鳥配列及び整形配列は同値となる⁹⁾。

$$a_s = \frac{B}{(B+W)^2 - B^2}; Z < h \dots (12) \quad G = 1 - \rho_r = 1 - \frac{B^2}{(B+W)^2}; Z < h \dots (13)$$

B : 模型幅, W : 模型間隔, h : 模型の高さ, ρ_r : 粗度体積密度

2-2 ラフネスパラメーター

抗力項中のラフネスパラメーター C_p 、 C_{ε} と粗度体積密度の関係は、図1に示すとおり丸山により実験的に整理されている⁹⁾。パラメーターの同定方法は次の通りである。即ち、千鳥状に配列された同一サイズの立方体粗度群の床面抗力に関する風洞模型実験と、2次元標準 k - ε モデルに抗力項を組み込んだキャノピーモデルによる数値計算の床面抗力が最適となる C_p 、 C_{ε} を求める、というものである。

3. 風洞実験および乱流数値計算の概要

3-1 風洞実験装置及び模型配列状況

本研究で用いた風洞装置は、全長約19.5mの回流式境界層風洞である。測定洞の寸法は長さ8m、高さ1m、幅1.5mである。実験は4タイプの模型配列について、計16ケース行っている。実験種別毎の模型配列及び測定点の配置状況を図2に、各実験ケースの模型配列の概要を表2に示す。

実験Aは同一サイズの直方体の千鳥配列で、丸山が図1のラフネスパラメーターを同定した際の実験条件⁹⁾である立方体の千鳥配列に近い条件である。これに対して、実験Bは同一サイズの直方体模型を整形配列した条件である。実験Cは高さの異なる2種類の直方体（以下、高い方の模型を高層模型、低い方の模型を低層模型とする）を、交互に配列している。模型高さの組み合わせが異なる3パターン、整形配列、千鳥配列の2通りの、合計8ケースについて実験を行っている。実験A～Cにおいて基準となる模型サイズおよび模型間隔は、代表的な高層・高密市街地としての丸の内および銀座における鉛直断面の平均的な形状⁹⁾から決定している。

これに対し、実験Dは、福岡市の中心的市街地500m四方を再現したもので、用途地域は商業、法定容積率は600～800%に指定されている。対象地域の実際の風向を考慮して、2通りの風向について測定を行っている。対象とした街区は、比較的大きなオーブンスペースが散在し、街路方位と風向は一致していないという

特徴を有する。

模型の縮率は、実験A～Dのいずれも1/430である。また、測定点を模型周囲に3次元メッシュ状に配置し、特に気流の変化が激しい模型高さ以下の領域については、模型上空に比べて測定点を密に配置している。

実験Cの3ケース及び実験Dにおける粗度表面積密度 a_s 及び粗度体積密度 ρ_r の鉛直分布を図3に示す。市街地模型の実験Dは、床面付近から上空へ徐々に建物が疎になっている様子が分かる。

風洞内模型配置の概要を図4に示す。実験A、B及びCについては、境界層の発達を考慮して、測定対象エリアの上流側に約1.5mにわたり測定対象とする模型配列と同じパターンを設置している。実験Dについては、模型配列の風上側と風下側に、市街地模型と同じ平均建物密度となるように、直方体模型を整形配列している。

表1 キャノピーモデルの基礎式⁹⁾

$$\begin{aligned} \frac{1}{G} \frac{\partial G \langle u_i \rangle}{\partial x_i} &= 0 \dots (1) \\ \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_i} G \langle u_i \rangle \langle u_i \rangle &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(G \nu_i \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \right) \\ &\quad - \beta g_i \left(\langle \theta_i \rangle - \theta_m \right) - \varepsilon_{m,i} \Omega_i \bar{u}_i - F_{m,i} \dots (2) \\ \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_i} G \langle u_i \rangle \langle \theta \rangle &= \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(G \frac{\nu_i}{P_n} \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_i} \right) + \frac{\langle \bar{H}_s \rangle + \langle \bar{H}_i \rangle}{G C_p \rho} \dots (3) \\ \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_i} G \langle u_i \rangle \langle q \rangle &= \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(G \frac{\nu_i}{P_n} \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial x_i} \right) + \frac{\langle \bar{Q}_s \rangle + \langle \bar{Q}_i \rangle}{G \rho} \dots (4) \\ \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_i} G \langle u_i \rangle k &= \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(G \frac{\nu_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon + G_k + F_k \dots (5) \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_i} G \langle u_i \rangle \varepsilon &= \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(G \frac{\nu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon + C_{3\varepsilon} G_k + F_\varepsilon) \dots (6) \\ P_k &= \nu_i \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \dots (7) \quad G_k = g_i \beta \frac{\nu_i}{P_n} \frac{\partial \langle \theta_i \rangle}{\partial x_i} \dots (8) \\ F_u &= \frac{1}{2} a_s C_p \left(\langle u_i \rangle^2 \right)^{0.5} \bar{u}_i \dots (9) \\ F_\varepsilon &= \frac{1}{2} a_s C_\varepsilon \left(\langle u_i \rangle^2 \right)^{3/2} \dots (10) \quad F_\varepsilon = \frac{C_\varepsilon k^{3/2}}{L} \dots (11) \end{aligned}$$

x_i : 座標, u_i : x_i 方向の風速成分, t : 時間, ρ : 空気密度, p : 圧力, θ , θ_m : 温度, 仮温度, 平面平均仮温度, q : 水蒸気の混合比, k : 乱流エネルギー, ε : 乱流消散率, β : 体積熱膨張率, g_i : 重力加速度の i 方向成分, Ω_i : 渦動粘性係数, C_p : 空気定圧比熱, H_s , Q_s : 空気中における熱、水蒸気の発生量, H_i , Q_i : 分子拡散による x_i 方向の熱、水蒸気のフラックス, L : 乱れの長さスケール, ν_i : 渦動粘性係数, C_p, C_ε : x_i 軸方向のラフネスパラメーター a_s : 粗度表面積密度, G : 単位空間当たり流体体積, $\langle \bar{f} \rangle$: f の単位流体体積当たりアンサンブル平均, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_{3\varepsilon}=0.09$, $\sigma_k=1.00$, $\sigma_\varepsilon=1.30$

図1 ラフネスパラメータと粗度体積密度の関係(文献6より引用)

図2 実験種別毎の模型配列と床面付近の測定点位置(高さ 0.01m)

図4 風洞内の模型配列状況

表2 模型配列条件の概要

実験種別	特徴	ケース名	模型 高さ	配置	W/h_1	W'/h_2	粗度体積密度 ρ_v [-]		粗度表面積密度 a [1/m]		測定 点数	
							$z<h_1$	$h_1< z< h_2$	$z<h_1$	$h_1< z< h_2$		
A	同一サイズ直方体模型 の千鳥配列	A-S1	$h_f=1H$	千鳥	0.8		0.391		8.55		244	
		A-S2			1.2		0.277		5.12		412	
		A-S3			1.6		0.207		3.47		412	
B	同一サイズ直方体模型 の整形配列	B-N1	$h_f=1H$	整形	0.8		0.391		8.55		244	
		B-N2			1.2		0.277		5.12		412	
		B-N3			1.6		0.207		3.47		412	
C	高さの異なる 2種類の直方体模型の 整形配列・千鳥配列	C-N1A	$h_f=1H$ $h_2=2H$	整形	0.8	1.47	0.391	0.195	8.55	3.24	542	
		C-N2A			1.2	1.87	0.277	0.139	5.11	2.14	1088	
		C-N3A			1.6	2.27	0.207	0.103	3.47	1.54	892	
		C-S2A	千鳥	1.2	1.87	0.277	0.139	5.11	2.14	2444		
		C-N1B		$h_f=1H$ $h_2=1.5H$	整形	0.8	1.95	0.391	0.195	8.55	3.24	538
		C-N3B				1.6	3.02	0.207	0.103	3.47	1.54	846
		C-N1C	$h_f=0.5H$ $h_2=1H$	整形	1.6	2.93	0.391	0.195	8.55	3.24	470	
		C-N3C			3.2	4.53	0.207	0.103	3.47	1.54	706	
D	オープンスペースを有する 実在市街地模型	D-1	実在市街地(福岡市の中心市街地である天神地区)を再現した縮小模型を使用。 2風向について実験を行っている。								1495	
		D-2										

W : 模型間隔, H : 標準模型高さ 56.3mm 模型基準サイズ $B75 \times B75 \times H56.3$ mm, h_1 : 低層模型の高さ, h_2 : 高層模型の高さ, W' : 高層模型の間隔 ($W' = 2W + B$)

図5 接近流の平均風速と乱流エネルギーの鉛直分布

3-2 測定機器

模型周辺風速は、スプリットフィルムプローブ（日本科学工業製 Model 1288）を用いて主流方向 x 成分について測定を行う。プローブの出力は定温度型熱線流速計の CTA ユニット（日本科学工業製 Model 1101）、リニアライザ（日本科学工業製 Model 1103）を介して AD 変換器に取り込まれる。測定時間間隔 1 ms で約 30 秒間の全 30,720 個の平均値を解析に用いる。

3-3 接近流

模型高さに比較して十分厚く乱れも大きい乱流境界層を形成するため、模型群の上流にスパイヤ、乱流格子、ラフネスを設置している。尚、基準風速 $U_{z=0.7m}$ を 7m/s として、実験を行っている。

接近流の平均風速と乱流エネルギーの鉛直分布を図 5 に示す。尚、風速および乱流エネルギーは高さ 0.7m における風速で無次元化して表示している^(注2)。

3-4 キャノピーモデルによる乱流数値計算の概要

前述の表 1 に示す基礎式に基づき 2 次元標準 $k-\varepsilon$ モデルにキャノピーモデルを組み込んだ乱流数値計算を行い、風洞模型実験の再現を行う。格子分割、境界条件等の概要を表 3 に示す。キャノピーモデル中に含まれるラフネスパラメータ $C_{\mu}C_{pe}$ は丸山による同定結果から粗度体積密度の関数として定義するため、同じ粗度体積密度の条件下で、平面配置が異なる場合の風速プロファイルの違いは表現されない。

表 3 キャノピーモデルによる乱流数値計算の概要

計算領域	主流方向 X 3m × 高さ方向 Y 1.5m (図 4 に示す風洞内を 2 次元で表現)
メッシュ分割	不等間隔 (X 100 mesh × Y 50 mesh = 5000 mesh)
基礎式	乱流 $k-\varepsilon$ にキャノピーモデルを組み込んだ表 2 ^(注1)
流入境界条件	実験データ(図 5)
流出境界条件	u, k, ε の主流方向勾配ゼロ
床・天井境界条件	対数則に基づく壁関数で定義
ラフネスパラメータ	丸山による図 1 における $\beta=0^\circ$ の値を用い、各格子における粗度体積密度の関数として定義

4. キャノピーモデルによる数値計算と風洞実験の比較

4-1 同一サイズ直方体模型の千鳥配列・整形配列（実験 A, B）

各高さの実験値を面積重み平均して算出した空間平均風速の鉛直分布とキャノピーモデルによる計算値の比較を行う。同一サイズ直方体の千鳥配列（実験 A）及び整形配列（実験 B）の結果を、粗度体積密度で分類して図 6(a)~(c) に示す。

キャノピー上空では、いずれのケースも直線上にプロットが並ぶ対数分布を示し、同じ粗度体積密度の条件下では、千鳥配列と整形配列の実験値はほぼ同じ値となっている。また、キャノピーモデルによる計算値は実験値とほぼ一致している。

キャノピー高さ以下については、同じ粗度体積密度の場合、風上からみた粗度の立面積が大きい千鳥配列の実験値が整形配列の実験値に比べ小さな風速となっている。特に、最も粗度体積密度が大きいケース A-S1 は床面付近の風速がマイナスの値を示し、逆流が卓越している事が分かる。キャノピーモデルによる計算値は、ケース A-S2, B-N2 のみやや実験値との差が大きくなっているが、概ね実験値とほぼ類似の傾向を示し、千鳥配列（実験 A）と整形配列（実験 B）の中間の値を示している。

4-2 高さの異なる直方体模型の千鳥・整形配列（実験 C）

図 7 に高さの異なる 2 種類の直方体模型を交互に配列した場合の風速プロファイルを示す。高層模型の上空では、計算値と実験値はいずれも対数分布を示し両者は良く一致している。また、高層模型高さ以下の領域についても、計算値と実験値は類似の傾向を示している。これ

図 6 同一形状直方体の千鳥配列及び整形配列における風速プロファイルの実験値と計算値の比較

図7 高さの異なる2種類の模型による整形配列及び千鳥配列(実験C)の風速プロファイルの実験値と計算値の比較

らの結果から、用いたラフネスパラメータが、高さの異なる直方体模型配列時においても適用できると言える。

4.3 実在市街地の縮小模型(実験D)

福岡市の中心的商業地区を再現した縮小模型の風速プロファイルを図8に示す。尚、縦軸はエリア内の平均建物高さで無次元化を行っている。風向の異なる2条件のいずれも、平均建物高さ付近で実験値と計算値はやや異なる値を示しているが、床面付近においては両者は極めて近い傾向を示している。

5. 結論

キャノピーモデルを都市の風通し評価のツールとして位置づけ、以下の検討を行った。

- 1) 同一サイズ直方体模型の千鳥配列及び整形配列、高さの異なる2種類の直方体模型による千鳥・整形配列、実在市街地の縮小模型を用いた4種類計16通りの風洞実験を行い、模型周辺の3次元的气流分布の測定値から空間平均風速の鉛直分布を求めた。
- 2) 風洞実験を再現したキャノピーモデルによる数値計算を行い、実験値との比較を行った。尚、キャノピーモデル中のラフネスパラメータは、丸山の示した立方体千鳥配列の値を用い、粗度体積密度の関数として定義した。

その結果、キャノピーモデルによる計算値と実験値は、いずれのケースも概ね一致する事が確認された。

以上により、粗度体積密度の関数として表現されたラフネスパラメータを用いることで、キャノピーモデルは、市街地上空のみならず、キャノピー層内、地表面付近における街区の平均風速の予測ツールと

図8 市街地模型(実験D)における風速プロファイルの実験値と計算値の比較

なりうると考えられる。

今後は、筆者らが別途開発を進めている都市高温化予測シミュレーター「建築—都市—土壌連成系モデル AUSSSM(Architecture—Urban—Soil Simultaneous Simulation Model)」の大気側サブモデルにキャノピーモデルを組み込み、都市高温化の定量的要因解析を行う予定である。

注記

注1) 本稿では中立時についてのみ検討を行っているため、数値計算において表2の式(3)及び式(4)は使われていない。

注2) 風洞模型実験の流入風、測定機器等の実験条件及び実験Cのデータは拙稿¹⁰⁾と同一のものである。併せてご高覧頂きたい。

謝辞

風洞模型実験は、当時九州大学大学院生森竹千景氏、大原健志氏、当時近畿大学4年生江副紀子氏によって行われた。本研究の一部は文部省科学研究費・地域連携推進研究「地域熱供給計画支援都市熱環境シミュレーターの開発」(代表片山忠久,課題番号 11792017)に拠る。ここに記して感謝の意を表する

【参考文献】

- 1) 例えば、村上周三,日比一喜,持田灯, Large Eddy Simulation による街区周辺の乱流場の3次元解析(その1) 隣棟間隔の変化が流れ場に与える影響と風洞実験の比較, 日本建築学会計画系論文報告集, No.412, pp.1-10, 1990.6
- 2) 例えば、森川泰成,工藤圭子,小野浩志,西村正和, 市街地における温熱環境の予測・評価手法の検討—Rapid Prototype 技術の適用—, 日本建築学会学術講演梗概集(関東)1997年9月, pp.869-872, 1997.9
- 3) 鶴野伊津志,植田洋匡,若松伸司,中村晃, 乱流モデルによる夜間都市境界層の形成機構の検討, 衛生工学研究論文集, Vol.24, pp.125-137, 1988
- 4) 平岡久司,丸山敬,中村泰人,桂順治, 植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究(その1)乱流モデルの作成, 日本建築学会計画系論文集 No.406, pp.1-9, 1989.12
- 5) 丸山敬, 立方体粗度ブロックの配列形状の違いによる抗力の変化について,日本風工学会誌,No.49,p.15-24, 1991.11
- 6) 丸山敬, 粗面上に発達する乱流境界層の数値シミュレーション(その2:市街地のように粗度形状が複雑な場合),日本風工学会誌 No.47, p.81-82, 1991.4
- 7) 丸山敬, 粗度要素の抵抗および体積変化を考慮した $k-\epsilon$ モデルによる乱流境界層の数値計算, 日本建築学会構造系論文集 No.404, pp.75-81, 1989.10
- 8) ヴタンカ,足永靖信,浅枝隆, 都市大気境界層の乱流モデリング 都市建築計画における都市気候予測システムの開発その1, 日本建築学会大会計画系論文集 No.536, pp.95-100, 2000.10
- 9) 早稲田大学尾島研究室資料: 都市の断面形態比較, 1994.7
- 10) 萩島理,片山忠久,谷本潤,森竹千景,江副紀子, 高さの異なる直方体模型群の周辺気流特性に関する風洞実験, 日本建築学会計画系論文集 No.538, pp.15-21, 2000.12

(2001年2月9日原稿受理, 2001年5月11日採用決定)