

## 街区形状の変化が屋外風系と温熱環境に及ぼす影響の数値解析

Effect of Building Configuration on Outdoor Thermal Environment

原山和也\*・村上周三\*\*・吉田伸治\*

Kazuya HARAYAMA, Shuzo MURAKAMI and Shinji YOSHIDA

## 1. はじめに

近年、都市の人口集中に伴う緑地等のオープンスペースの減少が市街地の温熱環境を悪化させる要因の一つとなっている。この劣悪な夏季の屋外温熱環境の緩和方法として、風が歩行者空間に効率良く流入する街区設計の重要性が注目されている<sup>文1,2)</sup>。また、現状の都市人口を維持しつつ快適な屋外環境を得るためには建物の高層化を行いそれによって生じたオープンスペースに緑地を効率良く配置することも検討されている。しかし、この建物形状の変化は街区内の天空率、通風率の変化を引き起こし、これが街区内の気流・温熱環境に変化を及ぼす。最適な街区設計を行うためには、これらの変化について十分に検討する必要がある。そのためには各気象要素の変化を考慮した連成解析による検討が有効である。そこで、本報では既報<sup>文1,3)</sup>で示した対流・放射・湿気輸送連成解析により、街区形状の変化が屋外温熱環境に及ぼす影響について検討する。ここでは、まず街区形状の変化による風速、気温の空間分布の変化について検討する。次にその結果を用いて歩行者空間内の平均風速と流体力学的抵抗を表す粗度長 $Z_0$ との関係に着目した検討を行う。

## 2. 解析概要

## 2.1 解析対象並びに計算ケース(図1, 表1)

図1に計算対象の概念図を、また表1に図1の街区モデルの形状データを示す。case1の低層密集街区を基本ケースとする。この街区モデルは現状の東京都墨田区の街区データを基に作成した<sup>文4)</sup>。これに対して、case2, case3では、容積率一定(108.6%)の条件下で街区全体の建物を中層、高層建物に変更した(表1)。また建物、空地部はコンクリート、道路はアスファルトで被覆されていると想定した。

\*東京大学大学院

\*\*東京大学生産技術研究所 情報・システム大部門

## 2.2 気象条件

東京の7月23日の15時の気象条件を対象とする。風向は南、風速は高さ74.6mにおいて3.0m/s、上空の気温、相対湿度を各々31.6°C、58%と想定した。

## 2.3 乱流モデル

通常の標準型k-eモデルに対して以下に示す改良を施した。乱流熱フラックスの評価はLaunderの提案するWETモデル<sup>文5)</sup>を使用した。また、建物風上側の乱流エネルギーの過大生産を抑制する改良Launder-Katoモデル<sup>文6,7)</sup>を併せて組み込んだ。

## 2.4 計算手法

まず、日射計算により地表面、建物外表面に吸収される日射量を求め、これと長波放射、顕熱輸送量、潜熱輸送量、熱伝導量からなる熱収支を物体表面で解き、地表面、建物外表面温度、対流熱伝達量、湿気伝達量を求めた。ここで、建物壁体の熱伝導量は、建物壁体の熱コンダクタンス $5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ (これはコンクリート厚280mmの壁に相当)、室温 $26^\circ\text{C}$ 、室内側壁面の対流熱伝達率 $4.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ と仮定した。また、地中の熱伝導量は、地中の熱伝導率 $1.16 \text{ W/mK}$ 、地中0.5mの温度を $26^\circ\text{C}$ と仮定し計算した。又、建物外壁、並びに地表付近における対流熱伝達率は $11.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ 一定とした。次に、これより得られた地表面・建物壁面の対流熱伝達量、湿気伝達量を境界条件としてCFD解析を行い、各点の風速、温度等の空間分布を算出した<sup>注1)</sup>。この場合、各気象要素の水平方向の境界条件には周期境界条件を使用し、地表面・建物外表面で発生した

表1 街区モデルの形状

	項目	case1 (低層)	case2 (中層)	case3 (高層)
1	建物高さ [m]	9.0	16.0	36.0
2	建物1辺の長さ [m]	9.0	13.5	9.0
3	1区画内の建物数	4	1	1
4	容積率 [%]	108.6		

熱は、全て上空境界より排出した。計算概要の詳細は文献 1, 3 を参照されたい。

### 3. 解析結果

#### 3.1 屋外空間の風系及び温熱環境に及ぼす影響

##### 1) 地表面・建物壁面温度分布 (図2)

図2に地表面温度並びに建物外表面温度分布を示す。また、中層ケースである case2 の建物外表面温度と case1 の各建物の道路部に面している表面温度の値に大きな差が見られないが、高層ケースである case3 では西側壁面温度が約 48°C と若干低下している。これは西側に隣接する建物も高層であるため西日が遮られ、西側壁面の一部が影となったためである。

##### 2) 風速分布 (図3, 4)

図3に高さ 1.5 m における風速ベクトルの水平分布を示す。図3の括弧内の数値は高さ 1.5 m のスカラー風速の平均値である。3 ケースとも建物棟間において大きな循環流が形成されているが、その性状は 3 ケースで全く異なる。低層密集街区を想定した case1 に対して中層街区を想定した case2 では、スカラー風速の平均値で 0.5 m/s 程度の風速

増加が生じるのに対して高層街区となった case3 では逆に case1 と比較して 0.2 m/s 程度、風速が低下している。また、風速の主流方向成分  $\langle u_1 \rangle$  の水平面内の平均値 (空隙部分のみ) の鉛直分布を図4に示す。こちらにおいても高さ 40 m より下方において case3 では急激に風速が低下している。どのケースもほぼ建物の半分程度の高さまで風速が低下しており、それより下はほぼ一定値となっている。case3 では建物が高い (36 m) ため、風速の低下区間も長くなり、他のケースに比べて低風速となっている。無限に並んだ街区を周期境界条件により解析した場合、case3 の様な高層街区において地表付近の風速が低下する結果は、直観的イメージとはやや異なるが過去にも得られていることである<sup>文8)</sup>。case2 (中層) と case3 (高層) の結果に違いが生じた理

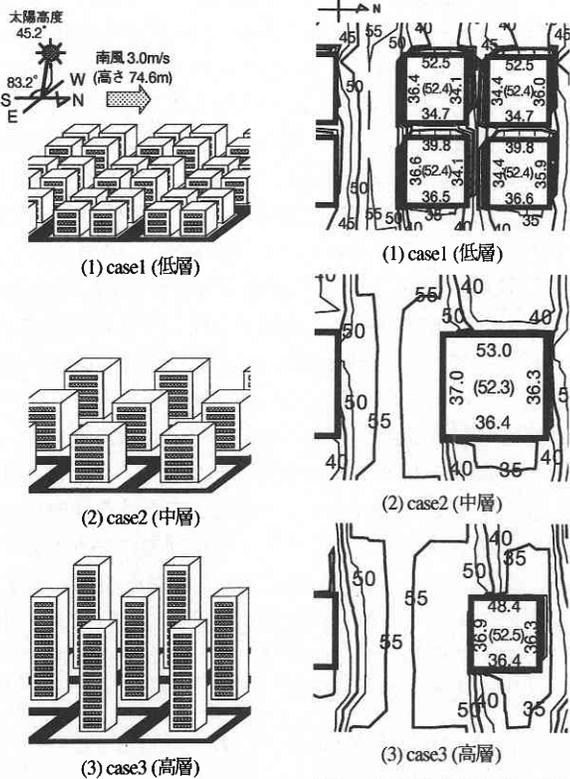


図2 地表面温度分布 [°C] (建物内の数値は各壁面 (括弧内は屋上面) の表面温度の平均値を示す)

図1 解析モデル (黒色部: アスファルト, 白色部: コンクリート)

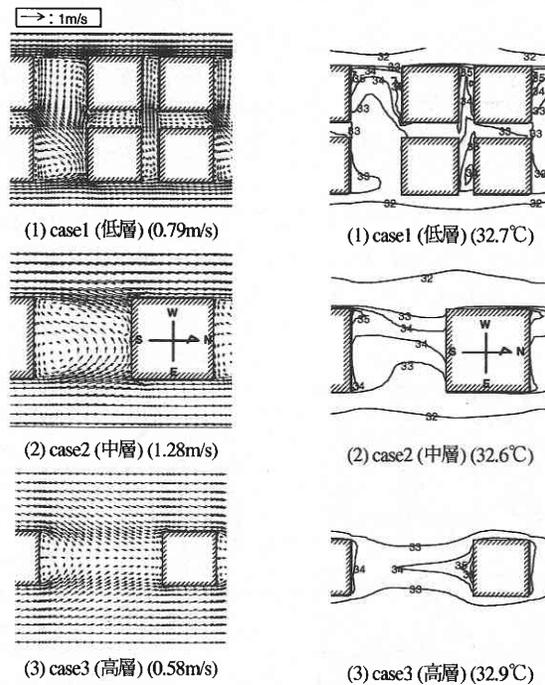


図3 風速ベクトルの水平分布 (高さ 1.5 m)

図5 気温の水平分布 [°C] (高さ 1.5 m)

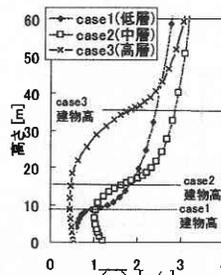


図4 風速の主流方向成分  $\langle u_1 \rangle$  の水平面内平均値の鉛直分布

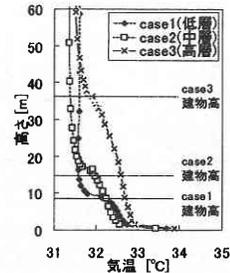


図6 気温の水平面内平均値の鉛直分布

研 究 速 報

由については3.2節で検討する. また case3は他のケースに比べて主流軸に対称な流れ場を示す. これには, 建物西側壁面の表面温度の変化が影響しているものと考えられる. つまり, case1, case2では, 建物西側壁面全体に日照がありその表面温度の平均値はそれぞれ52.5°C, 53.0°Cと他の側壁面に比べて極めて高く(図2(1), (2)), この壁に沿った強い上昇流が生じている. 一方, case3では建物西側壁面の地表近くは, 西側に隣接する建物の影となるため, 表面温度が低い(図2(3)). そのため, 上昇流が小さくなり対称な流れとなったものと考えられる.

3) 気温分布(図5, 6)

図5に図3と同じ表示位置での気温の水平分布を示す. 括弧内の数値は高さ1.5mの気温の平均値である. 各ケース共平均値が32°C後半の値を示し, 風速が全般に小さい case3のみ他のケースより比較的均一な分布を示すものの, 3ケース間で差は小さい. また, 図6に気温の水平面内平均値の鉛直分布を示す. case3は一般的な風速の低下(図4)により建物間に熱が滞留するため, 全般に気温が高い.

4) SET\*分布(図7)

図7に図3, 5と同じ表示位置での湿熱快適性指標 SET\*(Standard Effective Temperature)<sup>文9)</sup>の水平分布を示す. 括弧内の数値は高さ1.5mのSET\*の面内平均値である. 3

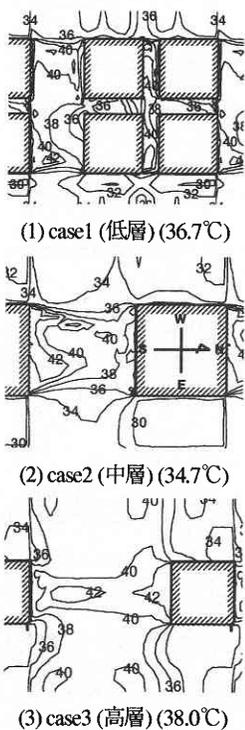


図7 SET\*の水平分布 [°C] (高さ1.5m)

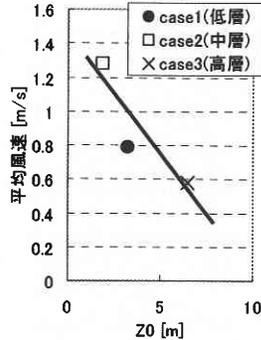


図8 粗度長 Z<sub>0</sub> と風速の関係

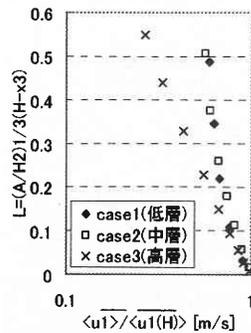


図9 無次元パラメータ L と風速の関係

ケース共弱風でかつ日向となる循環流域で38~42°C程度の高い値となる. また, case3では日影となる建物東側街路で34°C程度の値となり, case1より2°C, case2よりは4°C SET\*が高い. また高さ1.5mでのSET\*の平均値においても case3が38°Cと最も高い値となる. この結果は風速の低下, 気温上昇などいくつか考えられるが, 筆者らの過去の検討から考えて, 風速の低下の寄与が大きいと考えられる<sup>文13), 注2)</sup>. そこで次節では, この風速の低下と街区形状の関係を, 街区形状から推定される街区全体の粗度長 Z<sub>0</sub> と風速の平均値との対応から検討する.

3.2 街区形状の変化と風速の変化に関する検討

CFD(計算流体力学)の普及以前より, Z<sub>0</sub>は平板や地表面等の粗滑の程度を表す指標として用いられてきた. また, 街区形状の Z<sub>0</sub>を風洞実験により推定する研究も数多く行われている<sup>文10~13)</sup>. ここでは Lettau らの提案する街区の Z<sub>0</sub>の推定式(1)式)を利用して, CFD解析結果と対応させた.

$$Z_0 = 0.5 \frac{hs}{S} \dots\dots\dots (1)$$

ここで Z<sub>0</sub>は粗度長 [m], hは建物の平均高さ [m], sはシルエットエリア(建物群を主流方向から見た場合の見付け面積) [m<sup>2</sup>], Sは街区内の建物を配置した1区画の面積を建物棟数で除した値 [m<sup>2</sup>]である. (1)式より算出された各ケースの Z<sub>0</sub>の推定値と高さ1.5mのスカラ風速の平均値との関係を図8に示す. Z<sub>0</sub>の増加と風速の減少は, ほぼ線形の関係を示している. すなわち, 今回の一連の検討では case3(高層)の Z<sub>0</sub>は case1(低層)の Z<sub>0</sub>より大きいため, 街区による流体力学的抵抗が増加し, 過度の風速低下をもたらしたと考えられる. 一方, case2(中層)の Z<sub>0</sub>は case1(低層)の Z<sub>0</sub>より小さな値となったため, 街区による流体力学的抵抗が減少し風速が増加したものと推定される. ここで使用した粗度長 Z<sub>0</sub>は本来障害物の高さの風速プロファイルを決めるためのパラメータである. 本研究では建物の配置, 粗密, 高さ等がキャノピー内風速プロファイルに影響を及ぼす簡易な物理パラメータとして Lettau らの提案する Z<sub>0</sub>を準用した. しかし, 市街地の建物間の定性的な風速プロファイルはキャノピー理論に従うと考えられる. 最後にキャノピー理論に基づく検討を簡単に示す.

植生内キャノピーの上部では指数分布に従うことが知られている. K理論<sup>文14)</sup>に従えば, キャノピー内の風速プロファイルは次式で表される.

$$\langle u_1(x_3) \rangle = \langle u_1(H) \rangle \exp(-\gamma_m(H-x_3)) \dots\dots\dots (2)$$

$$\gamma_m = \left( \frac{C_d a}{4l^2} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, H:キャノピー高さ [m], C<sub>d</sub>:効力係数 [-],

$a$  : 葉面積密度 [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ],  $l$  : 渦のスケール [ $\text{m}$ ] である. 上記の植生キャノピーの理論を用いて都市キャノピー内における風速プロファイルを規定する簡易パラメータの提案を行う. 先ず, 葉面積密度の代わりに建物表面積密度として

$$A = \frac{\text{水平方向の建物周長}}{\text{1棟あたりの土地面積}} [1/\text{m}] \dots\dots\dots (4)$$

を導入する. またキャノピー内の渦のスケール  $l$  は建物高さ  $H$  に比例すると仮定し建物上端部からの下方向きへの鉛直無次元距離を表すパラメータとして

$$L = \left(\frac{A}{H^2}\right)^{\frac{1}{3}} (H - x_3) \dots\dots\dots (5)$$

を導入する. 図9に縦軸に  $L$  を横軸に建物高さの風速で無次元化したキャノピー内の上半分の水平方向平均風速  $\langle u_1(x_3) \rangle / \langle u_1(H) \rangle$  を示す. 立方体もしくはこれに近い建物形状である case1 と case2 はほぼ指数分布となっていることがわかる. case1, case2 が直線分布とならないのは, 比較的建物高さが低く, キャノピー内の渦のスケールが建物高さよりはむしろ空気上下温度差による安定度の影響を強く受けていること, キャノピー内における建物占有率が比較的大きく (流体占有率が小さく), キャノピー理論をそのまま適用することには若干の問題があるためと考えられるが, これらの点については今後の検討事項としたい.

#### 4. ま と め

- (1) 街区形状を変化させた3ケースについて夏季の屋外温熱環境を比較検討した.
- (2) 今回の計算条件では case2 (中層) は case1 (低層) に比べ風速の増加による温熱環境の改善が見られた. これに対して case3 (高層) は街区形状の変化による  $Z_0$  の増加が過度の風速低下をもたらし温熱環境は却って悪化した.
- (3) 本解析より適風環境を考える上で街区の  $Z_0$  が重要なパラメータであることが確認された. 今回利用した  $Z_0$  の推定式は, マクロな風環境や温熱環境を評価する際に活用できると考えられる. しかし, 実際の建物周辺の風は極めて複雑であるため, 詳細な環境評価のためには同時に CFD, 風洞実験による解析を行うことも有効であると考えられる.

#### 謝 辞

本研究は, 日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業研究プロジェクトの「高温多湿気候に適応する高密度住区モデルの開発 (研究代表 村上周三)」の一環として行ったものである. また, 東北大学の持田灯氏, 福井大学の岡龍三氏には, 研究全般に対する貴重な参考意見を頂いた. 更に, 国立環境研究所の上原清氏より  $Z_0$  の推定に関する貴重な文献を頂いた. ここに記して深甚なる謝意を表します.

#### 注

- 注1) 本解析では地表面, 建物外表面の蒸発効率はいずれも0である. そのため, 解析領域内には水蒸気の発生がないため, 絶対湿度に空間分布は生じない. すなわち, 相対湿度は気温の空間分布に対応した分布となる.
- 注2) 今回, 風向は南風のみ計算しか行っていない. 風向によっては今回の解析とは異なる結果が生じることが十分考えられる. これについては今後検討したい.  
(2000年11月8日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 吉田, 村上, 持田, 大岡, 富永, 対流・放射・湿気連成解析による緑地の温熱環境緩和効果の検討, 生産研究, 第52巻第1号, 83-86, 2000. 1.
- 2) 吉田, 堀越, 名古屋市中川運河における海風遡上が体感気候に及ぼす影響, 笹島地区における「風の道」を活かした都市計画への提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D-1), 689-690, 1998. 9.
- 3) 吉田, 村上, 持田, 大岡, 富永, 金, 対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析, 日本建築学会計画系論文集, 第529号, 77-84, 2000. 3.
- 4) 東京の土地利用 平成8年東京都区部, 東京都, 1993.
- 5) B. E. Launder, On the computational of convective heat transfer in complex turbulent flows, Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, Vol.110, 1112-1128, 1998.
- 6) B.E.Launder, M. Kato, Modelling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder, ASME Fluid Eng. Conference, 157, Unsteady Flows, 189-200, 1993. 6.
- 7) 近藤, 村上, 持田, 改良 k-e モデルによる建物モデル周辺気流の数値計算, 第8回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 363-366, 1994.
- 8) 松井, 村上, 持田, 都市の空気環境に関する研究 その1, 過密化, 高層化に伴う換気効率の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), 537-538, 1992.
- 9) A. P. Gagge, J. A. J. Stolwijk, Y. Nishi, A standard predictive index of human response to the thermal environment, AHSRAE Transactions, 92 (1), 709-731, 1986.
- 10) H. Lettau, Note on aero-dynamic roughness parameter estimation on the basis of roughness element description, Journal OF Applied Meteorology, Vol. 8, 828-832, 1969. 10.
- 11) R. L. PETERSEN, A wind tunnel evaluation of methods for estimating surface roughness length at industrial facilities, Atmospheric Environment, Vol. 31, No. 1, 45-57, 1997.
- 12) Y. Jia, B. L. Sill, T. A. Reinhold, Effects of surface roughness element spacing on boundary-layer velocity profile parameters, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 73, 215-230, 1998.
- 13) M. Bottema, Urban roughness mapping-validation techniques and some first results, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 74-76, 163-173, 1998.
- 14) 日本流体力学会編, 流体力学ハンドブック (第2版), 丸善, 1998.