

都市歩道空間の風環境評価のための Large-Eddy Simulation

Assessment of urban pedestrian wind environment derived from Large-Eddy Simulation

- 池田恭彰, 九州大学, 福岡県春日市春日公園 6-1, 2es13150r@s.kyushu-u.ac.jp
萩島理, 九州大学, 福岡県春日市春日公園 6-1, ayahsgishima@kyudai.jp
池谷直樹, 九州大学, 福岡県春日市春日公園 6-1, ikegaya.naoki@kyudai.jp
谷本潤, 九州大学, 福岡県春日市春日公園 6-1, tanimoto@cm.kyushu-u.ac.jp
Azli Abd Razak, マラ工科大学, セランゴール州シャー・アラム, マレーシア, azlirazak@salam.uitm.edu.my
Yasuaki Ikeda, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka
Aya Hagishima, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka
Naoki Ikegaya, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka
Jun Tanimoto, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka
Azli Abd Razak, Universiti Teknologi MARA, Shah Alam, Selangor, MALAYSIA

The turbulent flow fields around various types of staggered building arrays derived from a previous large eddy simulation were analyzed in order to clarify how the pedestrian wind environment is affected by urban geometry. The pedestrian wind is characterized by spatial averaged mean flow in a region around each building with a width of 3 meters, which is further subdivided into 3 areas. Through the analysis, the followings findings were presented; 1) The profiles of spatially averaged mean wind in 3 areas as well as in the whole pedestrian space are much different from those for the whole area of streets, suggesting the possibility that an area-averaged wind of the whole canopy area is not representative for estimating pedestrian wind environment. 2) Wind speed at the pedestrian level in each area can be expressed by an exponential equation as functions of block aspect ratio and plan area ratio.

1. 緒言

都市部において、キャニオンに流入する気流は夏季の暑熱緩和のみならず、自動車の排ガスに代表される汚染物質を上空大気に効果的に排出するうえでも重要な役割を果たす。このため、建物群の粗密や高さばらつき等の市街地の幾何条件と気流性状の関係について多くの研究が為されてきた。

たとえば、孟ら⁽¹⁾は、立方体千鳥配列で模型密度の異なる 3 条件に対して風洞実験を行い、密度の増加に伴って流れ場が isolated roughness flow, wake-interference flow, skimming flow と対照的な flow regime に遷移する様子を明らかにしている。また、上原ら⁽²⁾は、二次元ストリートキャニオンについて風洞実験を行い、高さばらつきのある粗度群では高さが均一な粗度群に比べ鉛直方向風速が増加し、下降流と上昇流がキャニオン底層で連結することにより汚染物質の放出に効果的な気流場を形成していることを指摘している。一方で、成田⁽³⁾は風洞実験により、中建蔽率条件 (25%) において粗度の高さばらつきによりキャニオン近傍風速比とスカラ輸送係数の両方が低下することを明らかにしており、建蔽率により高さばらつきの効果が異なる可能性があることが示唆される。

数値計算により市街地気流の特性や都市幾何形状との関係を考察した研究例も報告されている。野津ら⁽⁴⁾は実在市街地を対象にしたガス拡散問題について風洞実験および LES 解析を行い、高層建物側方を流下するガスの挙動について検討を行っている。

こうした研究の中でも、歩行者の風環境に着目し地表付近と上空の風速比を指標として街路の風通しを評価した例として、竹林ら⁽⁵⁾は、整形行列実街区モデルより、建物高さのばらつきと街路空間の風通しの関係を分析したところ、千鳥状に高層建物が並ぶ場合に風通しが良くなることを指摘している。また、解析対象領域だけでなく風上領域の高さ方向グロス建蔽率(平均建物高さ基準)を小さくすることで風通しは増加すると報告している。また、久保田ら⁽⁶⁾は、日本の実在都市モデルを用いた風洞実験によって、歩行者高さの時空間平均風速比はグロス建蔽率と線形関係にある

ことを示した。加えて、同程度のグロス建蔽率条件では低層住宅地よりも中高層住宅地における風通しの方が良いことも明らかにしている。彼らはこれに関して、中高層建物群における建物高さのばらつきが風通しを改善させる要因であると考察している。一方、Razak ら⁽⁷⁾は、高さばらつきの有無や粗度のスレンダーさ、および建蔽率条件を変化させた千鳥状の直方体粗度配列の周辺気流場についての LES の計算データを用いて、地上 1.5m における時空間平均風速比が粗度立面積密度 λ_f により普遍的な指数関数で表現できることを明らかにしている。

これらの研究は地表付近におけるキャノピー全体の時空間平均風速を対象としているが、Cocceal ら⁽⁸⁾の解析結果に示される通り、都市キャノピーの地上付近の風速は水平面に大きな分布を有していることから、歩行者への風の影響評価という観点においては、建物近傍の歩道空間に限定した解析が望まれる。

これを受けて本研究では、粗度周辺の局所的な気流分布を考慮した上で、歩道空間の風速比と都市幾何形状の関係性を検討することを目的として、Razak ら⁽⁷⁾の LES による数値計算結果のデータベース中から均一高さの配列 12 種類を取り上げ、建物周囲の歩道領域の速度プロファイルや地表付近の風速に対する解析を行う。

2. 実験概要

2.1 数値モデル

本研究では並列計算に最適化された汎用 LES コード (Parallelized Large-eddy simulation Model, PALM⁽⁹⁾) を使用した、Razak ら⁽⁷⁾によるシミュレーション結果を用いて流れ場の解析を行う。PALM では、連続の式、非圧縮 Bussinesq 方程式、SGS-TKE (Sub-Grid Scale Turbulence Kinetic Energy) 方程式を基礎方程式とし、勾配拡散理論に基づく Deardorff⁽¹⁰⁾の乱流モデルを適用している。また、時間差分に 3 次精度 Runge-Kutta 法、空間差分に 2 次精度中心差分法 (Piacsek and Williams⁽¹¹⁾) を適用している。圧力算出には、Fractional step 法によるカップリングを適用し、得られた Poisson 方程式に FFT 法を使用している。計算コードの詳細は既報⁽¹²⁾⁽¹³⁾などを参照されたい。

2. 2 解析対象粗度配列条件

解析対象の粗度配列一覧を Table 1 に示す。Razak ら⁷⁾が計算した 15 種類の直方体千鳥配列うち、本研究では、粗度高さが均一な 12 配列について解析を行った。各配列の幾何条件は建蔽率 λ_p および粗度アスペクト比 α_p によって決定づけられる。なお、 λ_p は街区面積と粗度の屋根面積の比で、水平面上の粗度群の粗密を表す。また、 α_p は粗度単体の屋根面積と気流に対する立面積の比であり、粗度の気流に対するスレンダーさを意味する。各配列名には千鳥配列を意味する ST の後に、粗度アスペクト比、建蔽率が順に記されている(たとえば $\alpha_p=1, \lambda_p=25$ ならば ST1_25)。Fig.1 に各アスペクト比の粗度と寸法を示す。

2. 3 計算領域および境界条件

Fig.2 に計算領域の模式図を示す。流れ方向、スパン方向、鉛直方向に対する座標軸を x, y, z とし、対応する風速を u, v, w とする。解析対象は、 2×2 街区とする。いずれの配列についても、計算領域高さ L_z は、粗度高さ h の 4 倍とする。

グリッドサイズは、 x, y, z 方向に対して等間隔とし、すべての配列条件について $L/64$ としている。

固体表面の境界条件には対数則(粗度 $z_0 = 0.01m$)、流れ方向、スパン方向境界面には周期境界条件を適用し、定圧力勾配により流れが駆動される。系の圧力勾配は、Hagishima et al.⁽¹⁴⁾の同配列条件における風洞実験を参考とし決定している。上端境界には、free slip 条件が適用されている。

数値計算における時間刻み Δt は、約 0.04s から 0.025s である。また、系の収束は、dispersive stress と空間の主風速プロファイルから判断した。 $t = 0s$ から $t = 8000s$ を助走時間とし、収束後の $t=8000s$ から $t=24000s$ の時間平均値を以後の解析に用いている。

2. 3 解析方法

本研究で用いている Razak ら⁷⁾の数値計算では、粗度高さが 25~75m、粗度レイノルズ数 $Re^* = 1.1 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$ 程度であり、Snyder and Castro⁽¹⁵⁾によると系のレイノルズ数依存性は十分に小さいと考えられる。これによって、数値計算結果を任意の幾何スケールに読み替えることが可能となる。たとえば、地上 1.5m の歩行者高さにおけるキャノピー空間平均風速を解析の対象とした Razak ら⁷⁾は、地上から 0.05h, 0.1h, 0.25h のデータが 10, 5, 2 階建て建物群(高さ 30m, 15m, 6m)における歩行者高さのデータに相当すると解釈している。本研究においてもこれと同様に、歩道の幅を 3m と仮定し、建物壁面から 0.1h, 0.2h, 0.5h におけるデータが 10, 5, 2 階建て建物群の歩道空間に相当すると看做す。Fig.3 に、想定する建物高さ(階数)によって歩道空間の街路幅に対する比率が異なる様子を示す。併せて、10, 5, 2 階建てを想定した場合の歩道幅、および歩行者高さと粗度高さの比率をそれぞれ Table2 に示す。なお、歩道領域の中でも粗度との位置関係により速度場は大きく異なる事が予想されるため、歩道空間を Fig.4 に示すように Front, Side, Behind 領域に分割し、それぞれの領域についても個別に解析した。

3. 結果

3. 1 歩道空間の流れ場

Fig.5(a), (b)に、立方体の $\lambda_p=25\%$ (ST1_25)の $z=0.1h$ における $x-y$ 断面内、および粗度中心($y=0.5L$)における $x-z$ 断面内の速度分布を示す。速度は粗度高さ h の水平面内における時空間平均値で無次元化している。なお、建物を 10, 2 階建てと想定した場合の歩道空間、および歩行者高さを(a), (b)にそれぞれ破線で表示している。Side 領域の特徴として、主風向と平行な街路の高速チャンネル流と、

Table 1. Simulation cases

case	α_p	$\lambda_p[\%]$	L_x	L_y	L_z
ST0.3_44	0.33	44.4	9.0L	9.0L	4.0L
ST0.5_44	0.5	44.4	6.0L	6.0L	4.0L
ST1_4	1.0	4.4	9.5L	9.5L	4.0L
ST1_8		18.2	7.0L	7.0L	4.0L
ST1_16		16.0	5.0L	5.0L	4.0L
ST1_25		25.0	4.0L	4.0L	4.0L
ST1_33		32.7	3.5L	3.5L	4.0L
ST1_44		44.4	3.0L	3.0L	4.0L
ST1.5_16	1.5	16.0	5.0L	5.0L	6.0L
ST1.5_33		32.7	3.5L	3.5L	6.0L
ST1.5_44		44.4	3.0L	3.0L	6.0L
ST3_16	3.0	16.0	5.0L	5.0L	12L

λ_p : plan area ratio, L_x, L_y, L_z : length of domain for x, y and z direction, L : standard length (= 25m), STa_b (a : aspect ratio, b : plan area ratio)

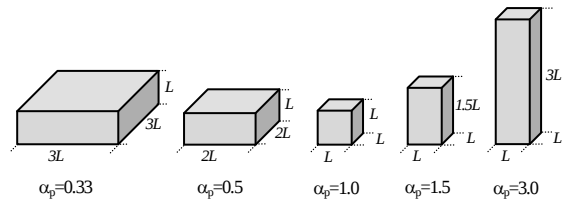


Fig.1 Ideal block roughness.
Each block is characterized by block aspect ratio, α_p ($L=25m$)

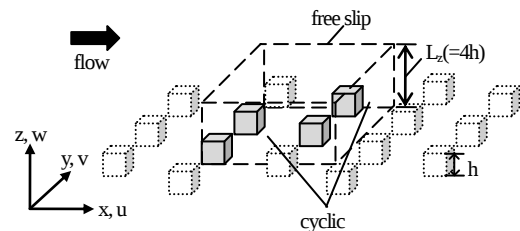


Fig.2 Calculation Domain

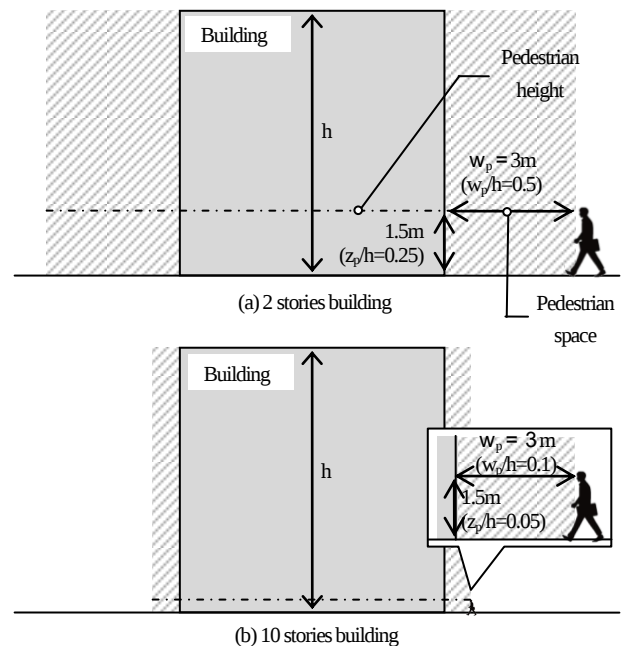


Fig.3 Relative dimension of pedestrian space varying with a building height

壁面近傍の弱風領域が混在していることが挙げられる。同様に、**Behind** 領域でも、壁面近傍の弱風領域と後列粗度からの吹き返しによる速度が大きい領域が複雑に入り混じっている様子が確認される。また、(b)に示す断面内において、**Front** 領域の地表付近に強い循環渦が形成されていることがわかる。

Fig.6(a), (b)に建蔽率が等しく粗度アスペクト比が異なる ST0.3_44 および ST1.5_44 における x - y 断面内($z=0.1h$)の速度分布を示す。粗度アスペクト比が小さい ST0.3_44 はキャニオンが浅いため、高い建蔽率であっても上空風が地表まで到達しやすく、街路の風速が比較的大きく保たれている一方で、高アスペクト比の ST1.5_44 ではキャニオン内の流速が小さいことがわかる。

3. 2 歩道空間の速度プロファイル

Fig.7 に 10 階建を想定した立方体建物($\alpha_p=1$)の歩道空間における風速プロファイルを粗度高さ h の水平面内平均値で無次元化した

Table 2. Relative dimension of a pedestrian space

Building stories	w_p/h	z_p/h
10	0.1	0.05
5	0.2	0.1
2	0.5	0.25

w_p : pedestrian space width, z_p : pedestrian height, h : building height.

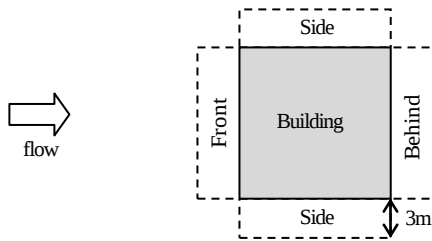


Fig.4 Classification of pedestrian space

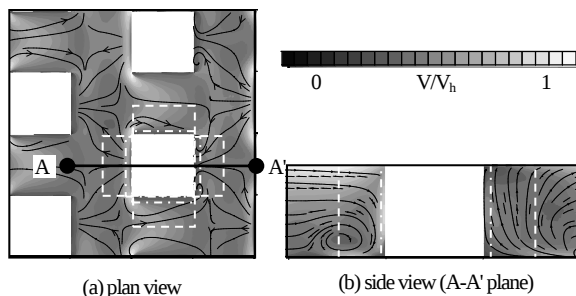
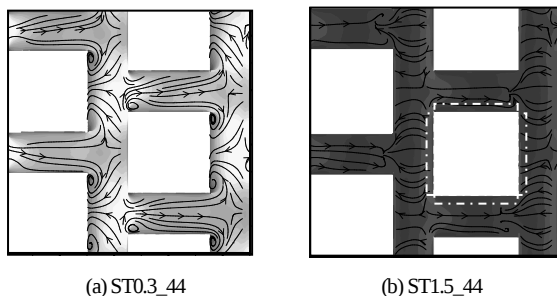


Fig.5 Flow field (ST1_25)
White dash lines; calculation target (pedestrian space)
- - - 2 stories, - - - 10 stories



(a) ST0.3_44 (b) ST1.5_44

Fig. 6 Plan view of low field
To keep the graph easy to see, only calculation target for 10 stories case is shown with white dash line.

- - - Pedestrian space of 10 stories building

て示す。なお、水平面内全領域を解析の対象とした Razak ら⁷⁾の結果を併せて(a)に示している。**Front**, **Side**, **Behind** いずれの領域においても、キャノピー全領域のプロファイルとは全く異なる分布形状が確認できる。

まず **Front** 領域では、 $\lambda_p=44\%$ を除くすべての建蔽率条件で S 字型のプロファイルとなっているが、これは壁面近傍の地表に形成される循環渦が原因と予想される。一方 **Side** 領域では、高密度条件($\lambda_p=33\%, 44\%$)で風速が比較的小さいものの、それ以下の低中密度条件では建蔽率に依らずプロファイルはほぼ同じ形状をしている。10 階建の高層建物を想定した場合、歩道空間がキャノピー全領域に占める割合は小さく、その大部分が壁面近傍の弱風領域となるため、配列ごとの差が生じなかったものと考えられる。同様に、**Behind** 領域でもプロファイルの形状に配列ごとの大きな差異は見られないが、**Side** 領域の場合と異なるのは、高建蔽率の配列ほど風速が大きいという点である。これは後列建物からの吹き返しによるものと推測される。

以上要するに、建物群のアスペクト比が同じの場合、建蔽率、建物高さに加えて、歩道のロケーション (**Front**, **Side**, **Behind**) により速度プロファイルは多様な傾向を示すことが明らかになった。

次に、建蔽率が高密度で等しい条件 (44%) において、粗度アスペクト比が異なる 4 条件(ST0.3_44, ST0.5_44, ST1_44, ST1.5_44) における歩道空間の風速プロファイルを比較して Fig.8 に示す。**Front** 領域では、粗度のアスペクト比が小さい条件ではプロファイルが S 字状の屈曲を示すのに対し、アスペクト比が大きく粗度がスレンダーになるに従い、徐々にプロファイルは直線的なものに遷移している。これは、スレンダーな建物が密集する状況では粗度の側面を通過する流れが強くなるため、高密度の立方体粗度配列にみられるような、キャニオン内に 1 つの安定した循環渦が生じる *skimming flow* とは異なる流れ場が形成されている事が要因の一つだと考えられる。**Side** 領域および **Behind** 領域については、キャニオンが浅い低アスペクト比条件において風速が大きい事が確認された。

以上の結果から、歩道空間の風環境評価に重要なのは建物高さ、粗度アスペクト比、建蔽率、および歩道空間の主流風向に対する位置の 4 項目であると結論付けられる。

3. 2 歩行者高さにおける風速の幾何依存性

Fig.9 に、10 階建を想定した場合の歩道空間内の風速比 V_p/V_{2h} (高さ $2h$ の空間平均速度と歩道高さ速度の比)と粗度立面積密度 λ_f の関係を示す。なお、キャノピー全領域を対象とした Razak ら⁷⁾による V_p/V_{2h} λ_f の関係式 (次式) を併せて実線で表示している。

$$V_p/V_{2h} = 2.5\lambda_f^{-0.8} \quad (1)$$

Front 領域では、Razak ら⁷⁾の示した式と同様に、粗度立面積密度の増加に伴い速度が指数関数的に減衰しているが、**Side** および **Behind** 領域ではその傾向が大きく異なる。加えて、**Front**, **Behind** 領域では、 $\lambda_f=15\%$ 付近において、低アスペクト比粗度 (ST0.3, ST0.5) のプロットが他の粗度アスペクト比のプロットより大きな値を示している事が確認できる。即ち、歩道空間内でも場所により速度場の粗度立面積密度依存性や粗度アスペクト比依存性は異なっていると言える。

以上の結果に鑑み、Razak ら⁷⁾が示した近似式(1)の説明変数である粗度立面積密度 λ_f は粗度アスペクト比 α_p と建蔽率 λ_p の積であることに着目し、歩道空間内の場所や粗度アスペクト比、建蔽率の速度場への影響を包括的に考慮する一般化式として(2)式を提案する。

$$V_p/V_{2h} = c\alpha_p^{-a}\lambda_p^{-b} \quad (2)$$

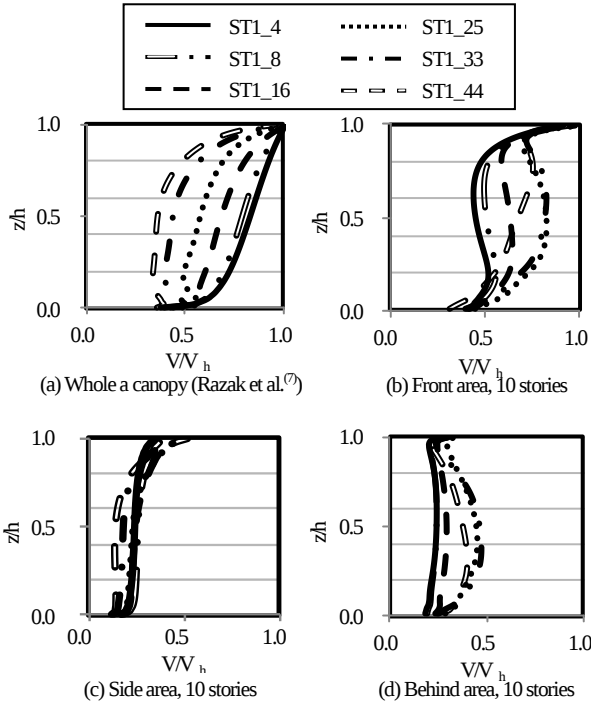


Fig 7. Wind speed profile (same block aspect ratio)

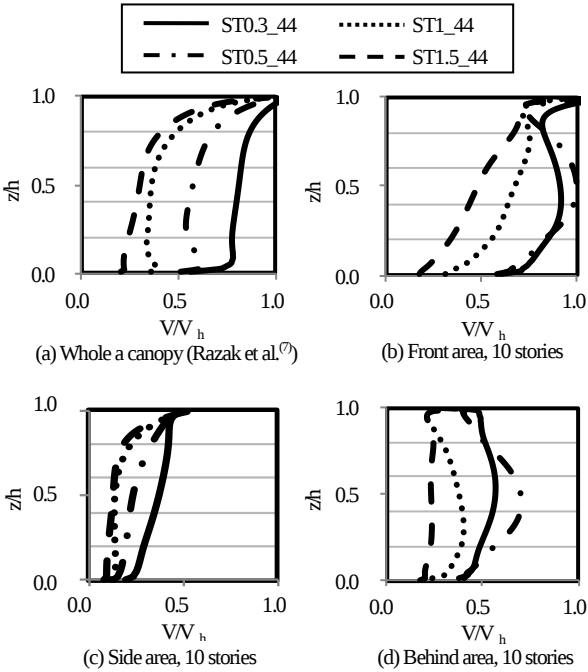


Fig 8. Wind speed profile (same plan area ratio)

式中の a, b, c は定数である。本研究の解析結果を用いて最小二乗法により同定した a, b, c の値と自由度調整済みの決定係数を Table 3 に示す。また、これらのパラメータを用いた(2)式による風速比の推定値と LES の計算値と比較した結果を Fig 9 に示す。なお、両者の値が等しい場合を破線、両者の誤差が $\pm 20\%$ となる場合を点線でそれぞれ示している。また、プロットの種類は階数を意味する。

水平面内全領域(Whole 領域)、および Front 領域では、どの階数を想定するかに関わらず (2) 式による推定値と解析結果は良く一致している。しかし、Side, Behind 領域では、想定する建物高さ (階数)によってプロットにばらつきがあり推定精度が低い。これは、

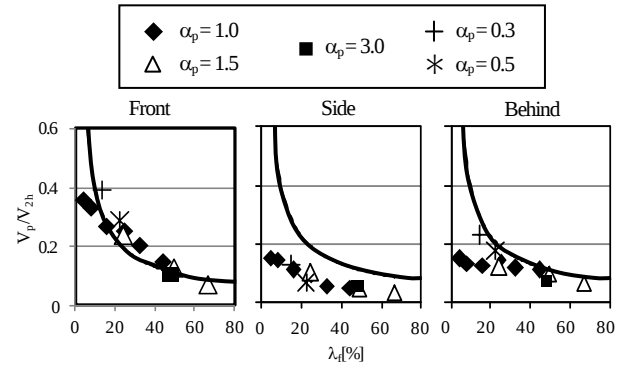


Fig. 9 Local wind speed at pedestrian height
Solid line : eq(1), $V_p/V_{2h} = 2.5\lambda_f^{0.8}$ (Razak et al.⁽⁷⁾)

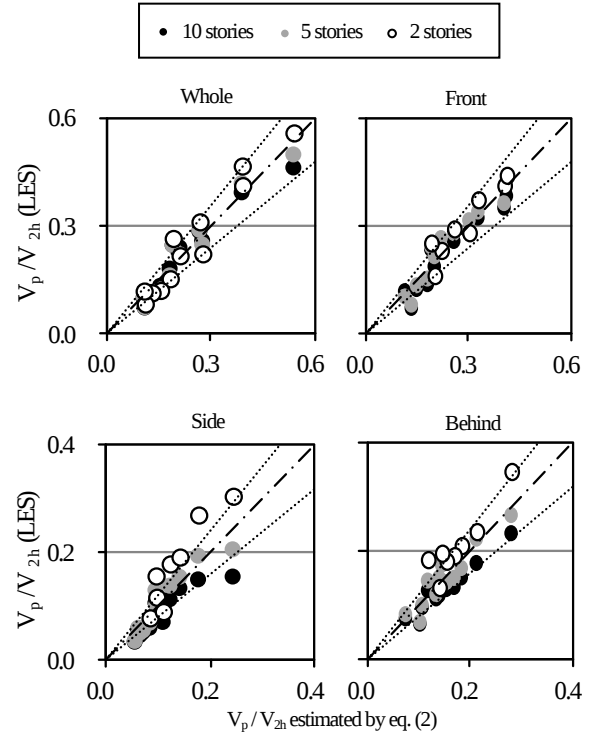


Fig. 10 Comparison of V_p/V_{2h} between LES simulation and estimation derived from eq. (2).
Color of plots represents building stories.
Dotted lines indicate $\pm 20\%$ error range from $Y=X$.

Table 3. Estimated coefficients included in eq.(2)

$V_p/V_{2h} = c \alpha_p^{-a} \lambda_p^{-b}$				
location	a	b	c	R^2
Whole	0.841	0.543	1.20	0.929
front	0.749	0.352	0.677	0.890
side	0.620	0.533	0.535	0.688
behind	0.671	0.137	0.222	0.745

p : pedestrian height [m], a, b : exponential indices for α_p, λ_p respectively,
 c : coefficient constant, R^2 : coefficient of determination of eq.(2).

両領域が、それぞれ風向に平行な街路のチャンネル流、および後列粗度の吹き返しに起因する高速度領域、と壁面近傍の弱風領域という対照的な速度場を含んでいることと関連があらう。即ち、10 階という比較的高い建物を想定した場合においては、歩道のキャノピー底部全域に対する面積比は小さく歩道領域は壁面近傍の弱風領域のみに占められるのに対して、建物が低層（2 階）になると、壁面から離れた高速度領域も歩道に含まれるため、アスペクト比および建蔽率の 2 変数のみで建物高さによらずに普遍的に歩道領域速度を説明することにやや無理が生じたと推察される。

また、推定式 (2) 中のパラメータ a, b の値の大きさから、速度比の推定値に対する α_p, λ_p それぞれの影響の大きさを考察すると、Front, Behind 領域では a が b より大きく、粗度アスペクト比が速度場に大きく影響を及ぼしていると考えられる。一方で、Side 領域では、 a と b の値が同程度であることから、この領域では建蔽率も速度場に対して大きな影響をもつことが推測される。

4. 結語

市街地における歩道空間の風速と都市幾何形状の関係を把握することを目的として、Razak ら⁷⁾の立方体千鳥配列 LES シミュレーションデータの中から、建蔽率や粗度アスペクト比の異なる均一高さ建物群の 12 条件を取り出し、気流場の解析を行った。歩道空間にあたる建物周囲 3m の領域を、主流風向に対する位置によって Front, Side, Behind 領域に分け、時空間平均風速比の幾何条件依存性を調査した結果は以下のとおりである。

(1) Front, Side, Behind 領域の無次元風速プロファイルは、キャノピー全領域を対象とした Razak ら⁷⁾の結果とは大きく異なる。また、歩道空間の速度場に影響を与える条件として、粗度高さ、粗度アスペクト比、建蔽率、および主流風向に対する建物と歩道空間の位置関係が重要であることが明らかになった。

(2) 歩道空間の風速比を表現するため、Razak ら⁷⁾の提案式を改善し、粗度アスペクト比と建蔽率を個別に取り扱う指数表現を導入したところ、近似値は計算値を概ねよく予測できた。

(3) 近似式の指数から、front, behind 領域では歩行者高さにおける速度場に対して粗度アスペクト比の寄与が大きく、side 領域では粗度アスペクト比と建蔽率の寄与が同程度であることが確認された。

また、今回は千鳥配列で歩道空間の評価に試みたが、整形配列のように長いストリートが確保されている場合の気流性状についても同様に検討する必要がある。このほか、平均値だけでなく瞬時値も解析し、強風の確率性状を調査することで歩道空間の風環境予測はより充実すると考えられる。

5. 謝辞

本研究の一部は科研費基盤研究(B) (25289196/代表 谷本), 科研費若手研究(B)(25820282/代表 池谷)の研究助成による。以上に記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 孟岩, 老川進, 建物群内における流れと拡散に関する実験的研究, 大気環境学会誌 32 (2), (1997), pp.136-147
- (2) 上原清, 山尾幸夫, 老川進, 持田灯, 通風の良いストリートキャニオンに関する風洞実験, 大気環境学会誌 42 (5), (2007)
- (3) 成田健一, 建物高さが不均一な街区の交換速度 都市域における各構成面別の交換係数に関する風洞実験 その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), (2007), pp.749-750
- (4) 野津剛, 田村哲郎, 都市における風の乱流場と拡散に関する LES, 第 24 回数値流体力学シンポジウム, (2009), D4-4
- (5) 竹林英樹, 山田俊明, 森山正和, 街区の空間特性が街路空

間の風通し環境に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集 76 (670), (2011), pp.1087-1092

- (6) 久保田徹, 三浦昌生, 富永禎秀, 持田灯, 実在する 270m 平方の住宅地における地域的な風通しに関する風洞実験, 日本建築学会計画系論文集 529, (2000), pp.109-116
- (7) Razak, AA., Hagishima, A., Ikegaya, N., Tanimoto, J., "Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment", Building and Environment 59 (2013), pp.56-65
- (8) Coceal, O., Thomas, TG, Belcher, SE., Spatial Variability of Flow Statistics within Regular Building Arrays, Boundary-Layer Meteorology, 125, (2007), pp.537-552
- (9) Raasch, S., Schröter, M., A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers, Meteorology Z.10, (2001), pp.363-372
- (10) Deardorff, JW., Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model, Boundary-Layer Meteorology 18, (1980), pp.495-527
- (11) Piacsek, SA., Williams, GP., Conservation properties of convection difference schemes, J Computational Physics 6, (1970), pp.392-405
- (12) 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 立方体粗度群床面-大気間のスカラー輸送現象に関する Large Eddy Simulation, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), (2010), pp.785-788
- (13) 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 立方体粗度群床面-大気間のスカラー輸送現象に関する LARGE-EDDY SIMULATION, 日本建築学会環境系論文集 76 (668), (2011), pp.943-951
- (14) Hagishima, A., Tanimoto, J., Nagayama, K., Meno, S., Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries, Boundary-Layer Meteorology 132, (2009), pp.315-337
- (15) Snyder, WH., Castro, IP., "The critical Reynolds number for rough-wall boundary layers", J Wind Eng Ind Aerodyn 90 (2002), pp.41-54