

理想街区における粗度立面積密度と歩行者高さの平均的な風通しとの関係の

実街区への適用性の検討

Study on the applicability of the relationship between frontal area index and mean wind velocity at pedestrian-level in simplified urban blocks to real urban districts

- 石川大, 東北大学大学院, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-1206, ishikawa@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp
- 高田一成, 東北大学大学院, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-1206, takada@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp
- 石田泰之, 東北大学大学院, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-1206, y.ishida@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp
- 持田灯, 東北大学大学院, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-1201, mochida@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp
- Masaru ISHIKAWA, Tohoku University, 6-6-11-1206, Aramaki-Aza, Aoba-ku, Sendai, Miyagi
- Issei TAKADA, Tohoku University, 6-6-11-1206, Aramaki-Aza, Aoba-ku, Sendai, Miyagi
- Yasuyuki ISHIDA, Tohoku University, 6-6-11-1206, Aramaki-Aza, Aoba-ku, Sendai, Miyagi
- Akashi MOCHIDA, Tohoku University, 6-6-11-1201, Aramaki-Aza, Aoba-ku, Sendai, Miyagi

LES was applied to flow fields in 14 types of simplified urban blocks by systematically changing the frontal area index and non-uniformity of building height, and in 13 real urban districts with different frontal area index in Sendai, Japan. Based on these results, the applicability of the relationship between the frontal area index and horizontal averaged effective speed at pedestrian-level derived from the results of simplified urban blocks to real urban districts was examined. Then, the contribution of each component of normal stress that composes mean kinetic energy and turbulent kinetic energy on effective speed was investigated.

1. はじめに

これまで都市温暖化や大気汚染の緩和を目的に、市街地の形態と歩行者高さにおいて形成される風環境の関係を整理するため、市街地形状パラメータと歩行者高さにおける時間平均風速の空間平均値との関係に関する研究が数多く行われてきたが、時間平均風速の定義、また、時間平均風速をどのような形状パラメータで整理するかは研究者によって異なっていた。時間平均風速の定義に関しては、瞬時のスカラー風速をある一定時間で平均化した時間平均風速を用いる場合^{(1)-(4)等}や、ベクトルを構成する 3 成分の時間平均風速から算出したスカラー風速を用いる場合^{(5),(6)等}、その取扱いには様々である。さらに、これら時間平均風速をグロス遮蔽率 λ_p ^{(1),(2),(5)等}や粗度立面積密度 λ_f ^{(3),(6)等}をはじめとする市街地の

形状を表すパラメータにより整理する試みがなされてきたが、未だ最適な指標の決定には至っていない。

筆者ら⁷⁾は、建物を直方体でモデル化し、直方体群の λ_p , λ_f 及び直方体群の流入風向に対する面の縦横形状比(アスペクト比)の領域内平均値 α_v を系統的に変化させた 14 ケースの街区(以下、理想街区)モデルを対象に LES を行い、歩行者高さの平均的な風環境は、 λ_f と変動成分を考慮した平均風速 effective speed (V_{es})⁽⁸⁾ の水平方向空間平均値(以降、 $[V_{es}]$)の関係から整理されることを示した。しかし、この関係が、建物高さや平面形態が一様ではない実街区に適用可能かどうかは未だ確かめられていない。

本研究では、形状パラメータを系統的に変化させた 9 ケースの理想街区モデルに加えて、LCZ(Local Climate Zone)区分⁹⁾に基づいて選定した 13 ケースの実街区を対象に LES を実施し、理想街区モデルにおいて確認された λ_f と $[V_{es}]$ の関係の、実街区における適用性を検討する。

2. 本研究における形状パラメータ及び時間平均風速の定義

市街地形状を特徴づけるパラメータとして、 λ_f , λ_p 及び α_v の定義を Fig.1 に示す。

次に、本研究で用いる時間平均風速 effective speed, V_{es} ⁽⁸⁾ の定義を (1)式に示す。 V_{es} は全運動エネルギー(平均運動エネルギー K と乱流エネルギー k の和)の速度次元換算値である。

$$\text{effective speed } V_{es} = \sqrt{\langle \bar{u}_i^2 \rangle} = \sqrt{\langle (\langle \bar{u}_i \rangle + \bar{u}_i')^2 \rangle} = \sqrt{2K + 2k} \quad (1)$$

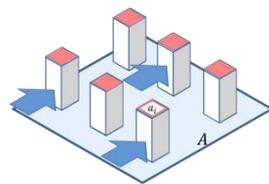
3. 解析概要

3.1 解析対象

Table1 に理想街区モデルの、Table2 に実街区の解析ケースを示す。理想街区モデルは同じ高さの立方体群を千鳥状に配置し、 λ_f を 11~57% の範囲で変化させた 6 ケース、及び 0.5H, 1.0H, 1.5H の高さの異なる 3 種類の高さの建物モデルを配置した、 λ_f の異なる 3 ケース($\lambda_f = 25\%, 35\%, 57\%$)の計 9 ケースを設定した。ケース名は、S(Simplified)の頭文字)-(λ_f の値)とした。

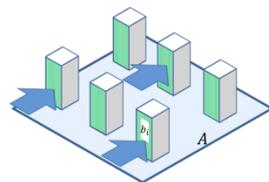
Plan area index

$$\lambda_p = \sum a_i / A$$



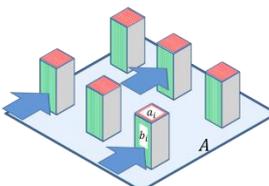
Frontal area index

$$\lambda_f = \sum b_i / A$$



Averaged aspect ratio

$$\alpha_v = \lambda_f / \lambda_p = \sum b_i / \sum a_i$$



a_i : each plan area of buildings within a unit,

b_i : each frontal area of buildings facing the wind direction of approaching flow within a unit,

A: plan area of unit.

Fig.1 Plan area index, frontal area index and aspect ratio

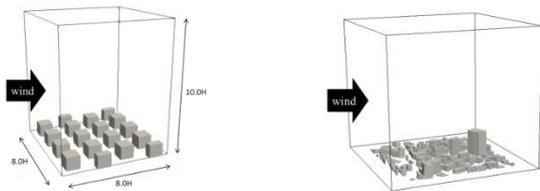
Table 1 Computed cases (simplified urban blocks)

Case	λ_f [%]	Building height	Domain size($x_1 \times x_2 \times x_3$)
S-11	11	$H(\text{uniform})$	$12.8H \times 12.8H \times 10.0H$
S-17	17	$H(\text{uniform})$	$9.6H \times 9.6H \times 10.0H$
S-25	25	$H(\text{uniform})$	$8.0H \times 8.0H \times 10.0H$
S-35	35	$H(\text{uniform})$	$6.7H \times 6.7H \times 10.0H$
S-44	44	$H(\text{uniform})$	$6.0H \times 6.0H \times 10.0H$
S-57	57	$H(\text{uniform})$	$5.3H \times 5.3H \times 10.0H$
S-25-3types	25	$0.5H, H, 1.5H$	$8.0H \times 8.0H \times 10.0H$
S-35-3types	35	$0.5H, H, 1.5H$	$6.7H \times 6.7H \times 10.0H$
S-57-3types	57	$0.5H, H, 1.5H$	$5.3H \times 5.3H \times 10.0H$

Table 2 Computed cases (real urban districts)

Case	LCZ class	λ_f [%]	λ_p [%]	Average building height	Normalized standard deviation of building height
R-2-40	LCZ2	40	34	17m	0.53
R-2-42	Compact mid-rise	42	34	21m	0.57
R-2-4-75	LCZ2 ₄ Compact mid-rise +Open high-rise	75	37	50m	0.78
R-3-9	LCZ3	9	26	6m	0.83
R-3-12	Compact low-rise	12	26	4m	0.50
R-4-2-41	LCZ4 ₂ Open high-rise +Compact mid-rise	41	36	33m	0.79
R-5-6-8	LCZ5 ₆	8	16	10m	0.70
R-5-6-10	Open mid-rise	10	24	10m	0.50
R-5-6-16	+Open low-rise	16	27	13m	0.62
R-5-6-18		18	26	11m	0.91
R-8-11	LCZ8	11	32	8m	0.63
R-8-12	Large low-rise	12	31	8m	0.63
R-8-14		14	32	9m	0.89

実街区は宮城県仙台市を対象に LCZ 区分⁹⁾の異なる 13 の街区を選定した。LCZ は、建物群の高さや密度と地表面の被覆に応じて市街地を定量的に分類したものである。さらに、対象街区が複数の LCZ の特性を有する場合、大部分を占める区分を大字(○)、小部分を占める区分を小字(□)とし「LCZ○□」と表現する。建物高さデータは、数値表層モデル Digital Surface Model(DSM)と数値標高モデル Digital Elevation Model(DEM)との差分から推定した。DSM には ALOS World 3D(5m 解像度)を、DEM には国土地理院が提供する基盤地図情報の数値標高モデル(5m 解像度)¹¹⁾を用いた。また、建物位置データは国土地理院発行の基盤地図情報の基本項目¹¹⁾から取得した。これらのデータを統合し、QGIS version 2.18 を用いて 3D の建物形状データを生成した¹²⁾。実街区の市街地形パラメータについては、 λ_p は GIS を用いて算出し、市街地の α_v



(1) Simplified urban blocks
(H : average height of buildings)
(2) Real urban district in Sendai

Fig.2 Examples of simulation cases

は各建物の建築面が正方形であると仮定し求める建築面積と、前

述の手法で算出した建物高さから主流方向に面する立面積から算出した。 λ_f は λ_p 、 α_v の値から求めた($\lambda_f = \alpha_v \times \lambda_p$)。ケース名は、R(Real の頭文字)-(LCZ 区分番号)-(λ_f)の値とした。Fig.2 に理想街区モデル、実街区の俯瞰図の一例を示す。

3.2 解析条件

理想街区モデルを対象とする LES の SGS モデルはコヒーレント構造 Smagorinsky モデル¹³⁾とした。主流方向及び主流直交方向の側面境界に周期境界条件を課し、解析領域の上空境界端セルにおいて運動量の主流方向成分(u_1)の運動方程式を解く際に一定の運動量 $S[\text{m}^2/\text{s}^2]$ を付加する方法¹⁴⁾を用い、流れを駆動した。駆動力は平均建物高さ H と、高さ $7H$ における主流方向平均風速から求めるレイノルズ数が 8.8×10^4 になるように設定した。空間差分スキームは建物屋上面の風上側角部のセルに梶島の修正 3 次風上差分¹⁵⁾を、その他の領域で二次中心差分を用いた。

実街区を対象とする LES には OpenFOAM-ver4.1 を用い、SGS モデルは標準 Smagorinsky モデル($C_s = 0.12$)とした。風向は東風とし、粗度区分Ⅲをターゲットとする流入変動風を、境界層高さ($x_3 = 450 \text{ m}$)における時間平均風速は 5 m/s として作成した。流入変動風は Xie and Castro の方法¹⁷⁾を基に、日本建築学会荷重指針・同解説で規定する平均風速、主流方向の乱れ強さ、積分長さスケールを課す検討をした大風・持田の手法¹⁸⁾⁽¹⁹⁾に基づき生成した。流出境界にはゼロ勾配型境界条件を、側面及び上面境界条件は slip 壁とした。解析領域(Fig. 3)は、東西 $1,080 \text{ m} \times$ 南北 $1,080 \text{ m} \times$ 高さ $1,000 \text{ m}$ とし、水平境界端からそれぞれ 135 m の範囲に滑面を設定し、 810 m 四方範囲の市街地形を再現した。評価領域は水平方向の中心にあたる東西 $270 \text{ m} \times$ 南北 270 m とした。実時間で 10 分間の助走計算を行った後、10 分間各種乱流統計量を取得した。

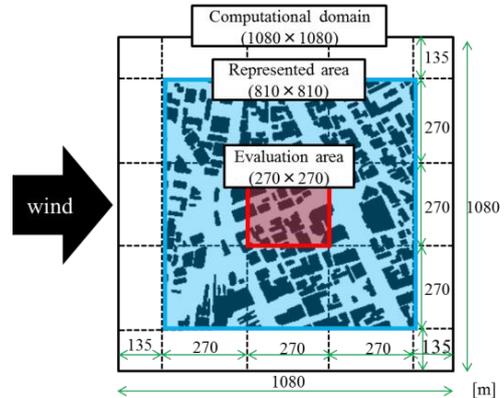


Fig. 3 Computational domain and evaluation area of real urban district
理想街区モデルでは $0.1H$ 高さを、実街区では 1.5 m 高さを歩行者高さとした。なお理想街区モデルでは $7H$ 高さ、実街区では 450 m 高さにおける主流方向の時間平均風速を用いて諸量の無次元化を行った。その他の解析条件を Table 3 に示す。

Table 3 Outline of LES computations

	Simplified urban blocks	Real urban districts
Time advancement	Second-order Adams-Bashforth	First-order backward
Spatial derivative	Second-order central difference+ Third-order upwind difference ¹⁵⁾	Second-order central difference
Algorithm	SMAC	PISO
Boundary conditions at building surfaces and ground	Approach by Werner and Wengle ¹⁶⁾	Spalding's low

4. 解析結果

4.1 λ_f と歩行者高さにおける $[V_{es}]$ との関係

Fig.4 に λ_f と歩行者高さにおける $[V_{es}]$ との関係を示す。まず、高さが一様である理想街区モデルの結果(図中の□)から、 λ_f が高いほど歩行者高さにおける $[V_{es}]$ が減少しており、既往研究⁽⁸⁾と同様の傾向が確認された。また、建物高さが非一様なケース(図中の◇)では一様なケースよりも高い $[V_{es}]$ となり、建物高さが非一様となることによる風速の増加は多くの既往研究⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁸⁾においても報告されている。さらに、 λ_f が高いほど、建物高さが一様なケースと非一様なケースの $[V_{es}]$ の差は大きい。次に、理想街区モデルの $[V_{es}]$ の値に対する実街区の $[V_{es}]$ の値の比が、 λ_f が 20%以下では 1 から 1.5 程度であったことに対し、 λ_f が 40%前後では 2.5 から 3 程度と大きい。既往研究⁽²⁾において、建物高さにバリエーションを与えることで地表付近の風速が増加することが示されているが、Table 2 に示した建物高さの無次元化標準偏差の値に着目すると、 λ_f が 40%前後の一部のケースの標準偏差が、 λ_f が 20%以下の一部のケースの標準偏差よりも小さい値を示しており、標準偏差と $[V_{es}]$ の間に必ずしも強い相関は見られない。

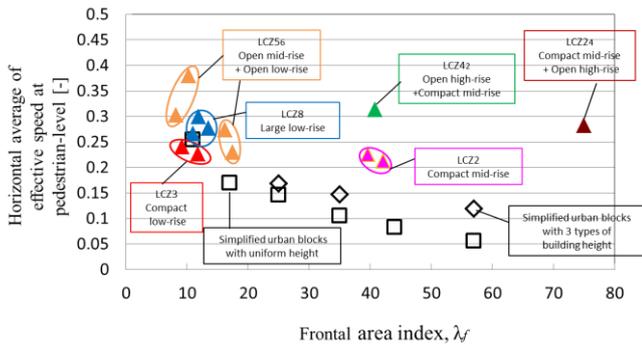


Fig. 4 Relationship between λ_f and $[V_{es}]$ normalized by $\langle \bar{u}_0 \rangle$ at pedestrian level

4.2 空間分布の比較

Table1 及び Table2 に示すケースのうち、 λ_f が比較的低い街区として Case_S-11($\lambda_f = 11\%$ 、建物高さ一様)、Case_R-3-9(LCZ3: 低層・高密度、 $\lambda_f = 9\%$)、Case_R-3-12(LCZ3: 低層・高密度、 $\lambda_f = 12\%$)を、 λ_f が比較的高い街区として Case_S-35($\lambda_f = 35\%$ 、建物高さ一様)、Case_S-35-3types($\lambda_f = 35\%$ 、建物高さ非一様)、Case_R-4-41(LCZ42: 高層・低密+中層・高密度、 $\lambda_f = 41\%$)について、 V_{es} 、時間平均風速ベクトルの歩行者高さにおける空間分布を比較する。

4.2.1 λ_f が比較的低い街区

Fig.5、Fig.6 に各ケースの歩行者高さにおける V_{es} 及び時間平均風速ベクトルの水平分布をそれぞれ示す。理想街区モデル (Case_S-11)では、建物隅角部の剥離流に沿って V_{es} が大きい一方、建物の風下側の V_{es} は小さい。また、剥離部を除きベクトルは概ね主流風向を向いている。実街区(Case_R-3-9、Case_R-3-12)では、局所的に高い V_{es} が確認される。また、ほとんどの建物の風下側で V_{es} の小さい領域が形成されている。

4.2.2 λ_f が比較的高い街区

Fig.7、Fig.8 に各ケースの歩行者高さにおける V_{es} 及び時間平均風速ベクトルの水平分布をそれぞれ示す。Fig.7 より、建物高さが一様な(理想街区モデル Case_S-35)では、全体的に V_{es} が小さい一方、建物高さが非一様(Case_S-35-3types)になると空間全体的に V_{es} が増加していることがわかる。また、Fig.8 から、建物隅角部での剥離流や高層(1.5H 高さ)建物風上面上における逆流が確認された。一方、実街区(Case_R-4-41)では、高層建物隅角部での剥離流及び領域中心部における強い逆流が現れ、ケースによって分布が大きく異なる。

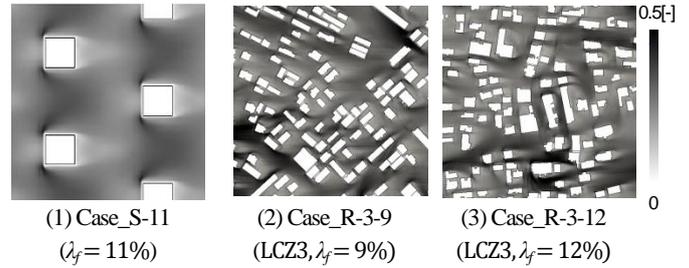


Fig.5 Horizontal distributions of V_{es} normalized by $\langle \bar{u}_0 \rangle$ at pedestrian level

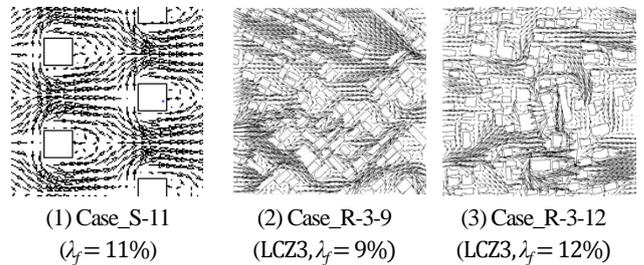


Fig.6 Horizontal distributions of time averaged wind velocity vector normalized by $\langle \bar{u}_0 \rangle$ at pedestrian level

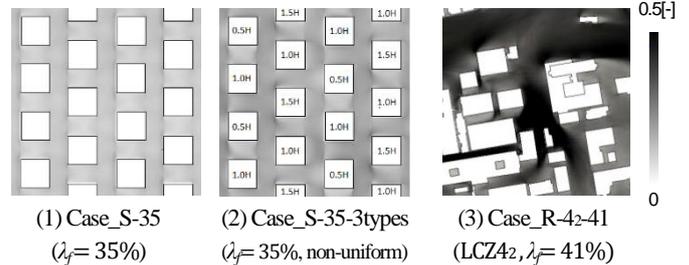


Fig.7 Horizontal distributions of V_{es} normalized by $\langle \bar{u}_0 \rangle$ at pedestrian level

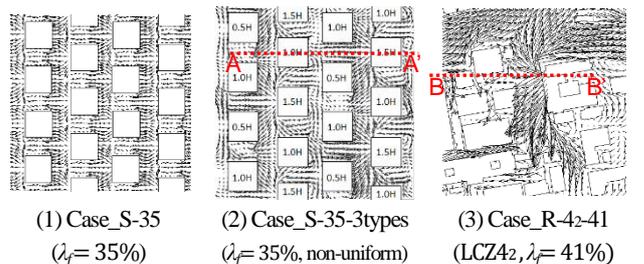
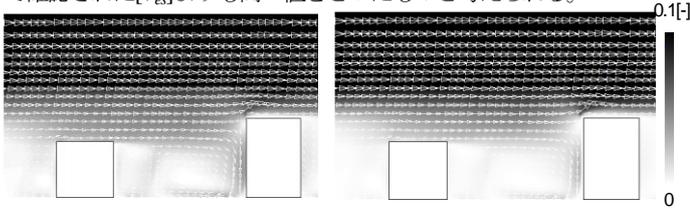


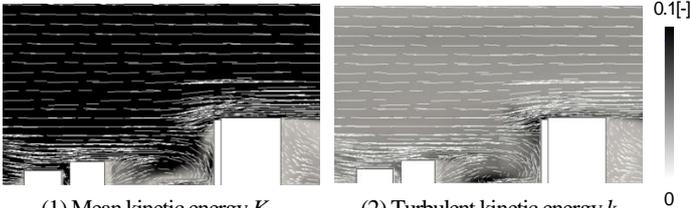
Fig.8 Horizontal distributions of time averaged wind velocity vector normalized by $\langle \bar{u}_0 \rangle$ at pedestrian level

Fig.9、Fig.10に、Fig.8(2)、(3)で確認された逆流発生箇所を含む断面(同図中に赤線で示すA-A'、B-B'断面)の、平均運動エネルギー K 及び乱流エネルギー k の鉛直分布を時間平均風速ベクトルと併せて示す。両ケースとも、高層建物の風上面上付近において上空からの吹き降ろしが発生しており、これに沿って比較的高い K と k が生じていることが確認できる。また、この影響は理想街区モデルよりも実街区の方が高い。実街区は全て建物高さが非一様であるため、この点においては建物高さが非一様な理想街区モデルと同様であると考えられるが、実街区には周辺建物よりも突出して高い建物を有する街区がある。Case_R-4-41、Case_R-2-75は高さの突出した建物を有する実街区である。Fig.8(3)、9、10で確認された鉛直方向の吹き降ろしや水平方向の強い剥離流や逆流は、この高さの突出した建物周辺の影響により形成された流れであると考えられる。ここから、Case_R-4-41では建物高さの非一様性による上空からの吹き降ろしの影響に加え、高さの突出した建物の影響によって発生するより強い吹き降ろしや、

これに起因する強い剥離流や逆流により地表付近に局部的に高い V_{es} が現れたものと考えられる。これにより、Fig.4では高さの突出した建物を有するCase_R-42-41、Case_R-24-75の $[V_{es}]$ が、理想街区で確認された $[V_{es}]$ よりも高い値をとったものと考えられる。



(1) Mean kinetic energy K (2) Turbulent kinetic energy k
Fig.9 Vertical distributions of K and k normalized by $\langle \bar{u}_0 \rangle^2$ at A-A' section of Case_S-35-3types



(1) Mean kinetic energy K (2) Turbulent kinetic energy k
Fig.10 Vertical distributions of K and k normalized by $\langle \bar{u}_0 \rangle^2$ at B-B' section of Case_R-42-41

4.3 全運動エネルギーに占める各成分の寄与

(1)式に示した V_{es} は、(2)式のように展開できる。

$$V_{es} = \sqrt{2K + 2k}$$

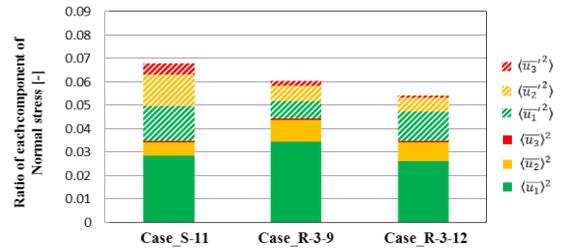
$$= \sqrt{\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2 + \langle \bar{u}_3 \rangle^2 + \langle \bar{u}_1 \rangle'^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle'^2 + \langle \bar{u}_3 \rangle'^2} \quad (2)$$

以下では、4.2節でとりあげた街区に対して、歩行者高さにおける V_{es} を、その構成要素である平均運動エネルギー K 、乱流エネルギー k 、さらにはそれぞれを各方向成分に分解し、全運動エネルギーに対する各成分の構成割合から各街区の歩行者高さにおける風環境の特性を分析する。

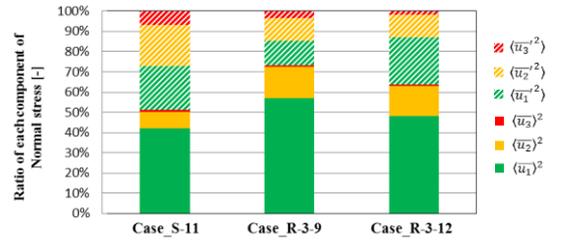
λ_f が比較的低い街区 (Case_S-11、Case_R-3-9、Case_R-3-12) では、Fig.11(1)から、3ケースとも、 K 、 k の水平方向の速度成分に関わる値 ($\langle \bar{u}_1 \rangle^2$ 及び $\langle \bar{u}_2 \rangle^2$ 、 $\langle \bar{u}_1 \rangle'^2$ 及び $\langle \bar{u}_2 \rangle'^2$) が大きく、特に $\langle \bar{u}_1 \rangle^2$ が大きい値を取る。Fig.11(2)より、その割合は $\langle \bar{u}_1 \rangle^2$ が約4から6割、 $\langle \bar{u}_1 \rangle'^2$ 、 $\langle \bar{u}_2 \rangle'^2$ はそれぞれ1から2割であった。このことから、 λ_f が比較的低いケースでは、理想街区モデル、実街区ともに、特に $\langle \bar{u}_1 \rangle^2$ が卓越する流れ場であると言える。

一方で、 λ_f が比較的高い街区では、Fig.12より、街区ごとでエネルギーの各成分の構成が大きく異なることがわかる。建物高さが一樣の理想街区 (Case_S-35) では全運動エネルギーの値が最も小さく、割合を見ると、 k の占める割合が、 K よりも大きい。建物高さが非一樣であるケース (Case_S-35-3types) においても同様に、 K と比較して k の占める割合が大きい。また、一樣のケース (Case_S-35) と比較して $\langle \bar{u}_1 \rangle^2$ の割合が約4割程度に増加しており、Fig.8(2)、Fig.9で見られた建物風上面の逆流によるものと考えられる。一方、実街区 (Case_R-42-41) では、 K の値が大きく、割合では $\langle \bar{u}_1 \rangle^2$ が約4割、 $\langle \bar{u}_2 \rangle^2$ が約3割となった。これはFig.8(3)、Fig.10で見られた領域中心部における剥離、逆流によるものと考えられ、これらの流れが、評価領域内で支配的であったことがわかる。

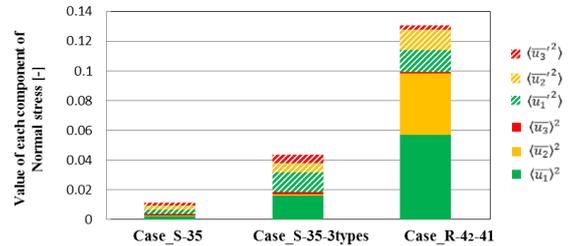
以上より、特に、様々な高さの建物が混在する実街区においては歩行者高さにおける平均的な風通しを予測する上では、突出した建物による V_{es} 増加の効果が市街地形形状パラメータにより適切に評価されることが重要である。そのためには、①平均的な高さの建物群の密度 (λ_f) で決まる風速と、②平均高さより突出したアスペクト比の高い建物の影響で決まる風速の両者の影響を考慮する必要があると考えられる。



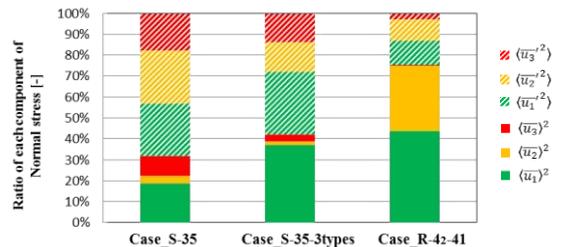
(1) Value of each component of normal stress that composes mean kinetic energy and turbulent kinetic energy normalized by $\langle \bar{u}_0 \rangle^2$ at pedestrian level



(2) Contribution ratio of each component of normal stress that composes mean kinetic energy and turbulent kinetic energy at pedestrian level
Fig.11 Comparison of the cases with relatively low λ_f



(1) Value of each component of normal stress that composes mean kinetic energy and turbulent kinetic energy normalized by $\langle \bar{u}_0 \rangle^2$ at pedestrian level



(2) Contribution ratio of each component of normal stress that composes mean kinetic energy and turbulent kinetic energy at pedestrian level
Fig.12 Comparison of the cases with relatively high λ_f

5. まとめ

9ケースの理想街区及び13ケースの実街区を対象にLESを実施し、理想街区モデルにおいて確認された粗度率面積密度 λ_f と歩行者高さにおける平均風速 (effective speed) の空間平均値 $[V_{es}]$ の関係性に対する実街区の適応性に関する検討を実施した。

λ_f が比較的低い街区では、理想街区、実街区ともに $\langle \bar{u}_1 \rangle^2$ が卓越する流れ場であった。 λ_f が比較的高い街区では、 $(K+k)$ に対する各成分の割合はケースにより様々で、特に平均的な建物高さから突出したアスペクト比の高い建物の風上面の吹き降ろしの影響を強く受ける。

記号

f	instantaneous value of a quantity
$\langle f \rangle$	time averaged value of f
f'	deviation from $\langle f \rangle$; ($f - \langle f \rangle$)
\bar{f}	filtered value of f
H	averaged building height [m]
K	mean kinetic energy of grid scale ($= 1/2 \times \langle \bar{u}_i \rangle^2$) [m^2/s^2]
k	turbulent kinetic energy of grid scale ($= 1/2 \times \langle \bar{u}_i'^2 \rangle$) [m^2/s^2]
u_i	three components of velocity vector ($i = 1, 2, 3$: stream-wise, lateral and vertical) [m/s]
$\langle \bar{u}_0 \rangle$	horizontal averaged value of time averaged stream-wise wind velocity at gradient height [m/s]
V_{es}	effective speed ($= \sqrt{\langle (\bar{u}_i + \bar{u}_i')^2 \rangle}$) [m/s]
$[V_{es}]$	dimensionless horizontal averaged values of V_{es}
x_i	three components of spatial coordinates [m]
α_p	averaged aspect ratio of buildings in a unit [-]
λ_f	frontal area of buildings facing stream-wise direction per lot horizontal area [%]
λ_p	plan area of buildings per lot horizontal area [%]

謝辞

本研究は科研費（課題番号：18K04453、代表：石田泰之、課題番号：17H03349、代表：持田灯）の助成により行われた。

参考文献

- 久保田, 三浦, 富永, 持田, "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建物群の配置・集合形態が地域的な風通しに及ぼす影響その1," 日本建築学会計画系論文集, 65, 529(2000), pp.109–116.
- 義江, 田中, 白澤, 小林, "高層密集市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響," 日本建築学会環境系論文集, 73, 627 (2008), pp.661–667.
- Abd Razak, A., 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.
- Ikegaya, N., Ikeda, Y., Hagishima, A., Razak, A. A., Tanimoto, J., "A prediction model for wind speed ratios at pedestrian level with simplified urban canopies," *Theoretical and Applied Climatology*, 127(3–4)(2017), pp.655–665.
- 竹林, 森山, 三宅, "気候資源としての風の利用を目的とした街路形態と街路空間の風通しの関係の分析," 日本建築学会環境系論文集, 74, 635 (2009), pp.77–82.
- Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C., Fung, J. C. H., "Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong," *Landscape and Urban Planning*, 101 (2011), pp.59–74.
- Ishida, Y., Takada, I., Mochida, A., Okaze, T., "LES on the relationship between geometric parameters of buildings and pedestrian-level wind velocity in the built-up areas," *The 7th International Symposium on Computational Wind Engineering 2018*, (2018).
- Kikumoto, H., Ooka, R., Han, M., Nakajima, K., "Consistency of mean wind speed in pedestrian wind environment analyses: Mathematical consideration and a case study using large-eddy simulation," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 173 (2018), pp.91–99.

- Stewart, I.D., Oke, T.R., "Local climate zones for urban temperature studies," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (2012), pp.1879–1900.
- Zhou, X., Okaze, T., Ren, C., Cai, M., Kasai, M., Ishida, Y., Mochida, A., "Mapping Local Climate Zones for Japanese Ordinance-designated Cities based on urban morphology detection: A case study of Sendai," *10th International Conference on Urban Climate/ 14th Symposium on the Urban Environment*, (2018).
- 国土地理院基盤地図情報, <http://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 瀧澤, 大風, 石田, 持田, "DSMとDEMを用いた市街地形の再現とこれを対象とするLES," 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2018), pp.857–858.
- Kobayashi, H., "The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow," *Phys. Fluids* 17(2005), 045104.
- Ishida, Y., Okaze, T., Mochida, A., "Influence of urban configuration on the structure of kinetic energy transport and the energy dissipation rate," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 183(2018), pp.198–213.
- 梶島, "非圧縮流れのための上流補間法," 日本機械学会論文集(B編), 60, 578 (1994), pp.97–104.
- Werner, H., Wengle, H., "Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel," *8th Symposium on Turbulent Shear Flows Proceedings*, 19, 4(1991), pp.155–165.
- Xie, Z.T., Castro, I.P., "Efficient Generation of Inflow Conditions for Large Eddy Simulation of Street-Scale Flows," *Flow, Turbulence and Combustion*, 81 (2008), pp. 449–470.
- Okaze, T., Mochida, A., "Cholesky decomposition-based generation of artificial inflow turbulence including scalar fluctuation," *Computers and Fluids*, 159 (2017), pp.23–32.
- 大風, 持田, "LES による市街地環境予測のためのデジタルフィルタを用いた人工的な流入変動風の生成," 第25回風工学シンポジウム論文集, (2018), pp.211–216.