

LES による実低層住宅地における気流特性の評価

Evaluation of Air Flow Characteristic in a Realistic Low-rise Residential Area by LES

- 村上 貴裕, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, murakami@criepi.denken.or.jp
 服部 康男, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, yhattori@criepi.denken.or.jp
 Takahiro Murakami, CRIEPI, 1646 Abiko, Abiko-shi, Chiba, Japan
 Yasuo Hattori, CRIEPI, 1646 Abiko, Abiko-shi, Chiba, Japan

Wind flow field in a realistic low-rise residential area computed by a large eddy simulation to evaluate the uniformity of the average velocity profile and the spatial correlation of velocity fluctuation in atmospheric surface layer. The result shows that the spatial uniformity of the average velocity is poor at span direction, and good at stream direction. However, the uniformity at stream direction also becomes poor below about two times of the building height, in where the direct effect from each of the buildings disturbs the wind profiles. The spatial correlation of velocity time series is also poor at span direction, and good at stream and height direction. In addition, the good correlation at stream and height direction is not kept below about two times of the building height.

1. 緒言

2018 年の台風 21 号や 2019 年の台風では強風によって一般家屋への被害や樹木倒壊が多数発生し、さらにこれらの二次被害で生じた配電柱の倒壊や折損により電力供給にも大きな障害が引き起こされた。家屋等からの飛来物や樹木倒壊による電力設備への二次被害の影響を予測・推定するためには、家屋や樹木の脆弱性に関する情報が重要になるが、ハザードの観点においても都市キャノピや森林キャノピといった大気設置層の下層域、すなわち堅牢性の低い構造物や配電設備が集中する地上数メートル～十数メートルの風速場を適切に評価することが必要である。大気接地層の風速の鉛直方向分布に対しては、しばしばべき乗則や対数則が用いられるが^①、構造物の直接的な影響を受ける大気接地層下層域では風速場の空間的非一様性が大きくなる。そのため、大気接地層下層域の風速評価精度を高めるためには個々の建物の影響まで考慮する必要があるが、現時点では都市キャノピ内の風速分布を広域に得ることは容易ではない。一方、確率的に被害の発生頻度を推定する場合には、時空間内での強風の瞬時的・局所的な高風速の発生頻度が被害発生リスクの指標の一つになると考えられる。そこで、本研究では実際の低層住宅地域の構造物を再現した体系で、LES による非定常計算を行い、大気接地層下層域における風速場の空間的な分布特性と変動成分における空間的な相関を明らかにする。

2. 解析条件

解析対象とした低層住宅地域は茨城県水戸市内の低層建物が密集する地域とし、図 1 に示すように 1000m×1000m の範囲を縮尺 1/200 の計算格子で再現した。図中のコンターは地上からの高さ（実スケール換算値）を表しており、計算領域内の建物の大半が 12m 以下の家屋となっている。計算格子の解像度は水平方向に 1m 程度、鉛直方向に関しては高さ 50m 以下では 0.5m とし、50m 以上では徐々にメッシュ解像度を粗くして上空 1000m までを計算領域としている。出入口の境界は周期境界条件として、スパン方向は滑り境界、建物・地面との境界は対数則で与えた。LES コードは Front FlowRed/NuFD を用いており、空間的に一様な駆動力を付加することで y 軸に平行する流れ場を発生させている。本報の計算結果は時間刻み幅を 0.5ms として 80s まで計算した結果を用いており、統計量は 70s～80s の 10 秒間を用いて算出した。

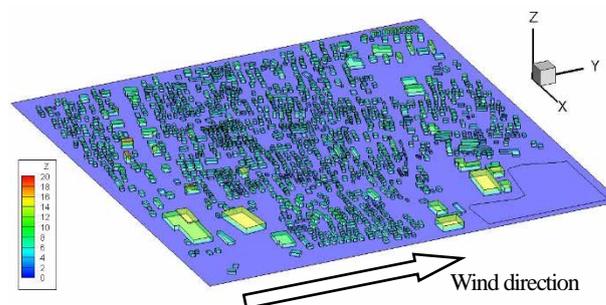


Fig. 1 Realistic low-rise residential area for LES

3. 解析結果

(1) 平均風速場の空間的非一様性

平均風速場の空間一様性を明らかにするため、図 2 の赤丸地点等の平均風速鉛直方向分布を図 3.4 に示す。図 3 では流れ方向に 2 つの位置 ($y=0m, y=-100m$) において、スパン方向の離隔距離に対する平均風速鉛直方向分布の差異を示しており、離隔距離と共に分布差が広がっている様子が分かる。特に 20m 以下の下層部では離隔距離 50m 程度であっても有意な風速差が見られ、建物より高い位置であっても平均風速が一樣と看做せる範囲は比較的狭いことが分かる。また、離隔距離が 100m 以上となると、下層からやや上層（地上から 100m 程度）まで有意な風速差が見られる。

一方、図 4 に示されるように流れ方向の平均風速鉛直方向分布においては、高さ 20m 以上では長距離に渡って変化が小さく、建物の 2 倍程度の高さ以上では空間的に一様性が保たれていることが分かる。しかしながら、高さ 20m 以下では低くなるに従って非一様性が強くなり、個々の建物による直接的な効果が大きいことを示している。

また、高さ方向に一定の区間で鉛直方向分布をべき乗則で近似して求めたべき指数（高さ別のべき指数）を求めたところ、図 4(b) に示されるように高さ 40m 以上ではべき指数は概ね 0.2～0.3 となり、粗度区分 III～IV に相当する鉛直方向風速分布^②に相当し、高さ 20m 以下では急激なべき指数の増加が確認される。これはゼロ面変位（概ね建物高さの 0.7 倍程度と考えられる）に近づくにつれて、べき乗則よりも対数則

の適用性の方が高いことを示している。また、図 4(a)ではほとんど差異が見られなかった高さ 40m 以上においても、べき指数の変化が大きく、個々の建物の直接的な影響で生じた鉛直方向のフラックスが比較的上層の風速勾配に影響していることを示唆している。

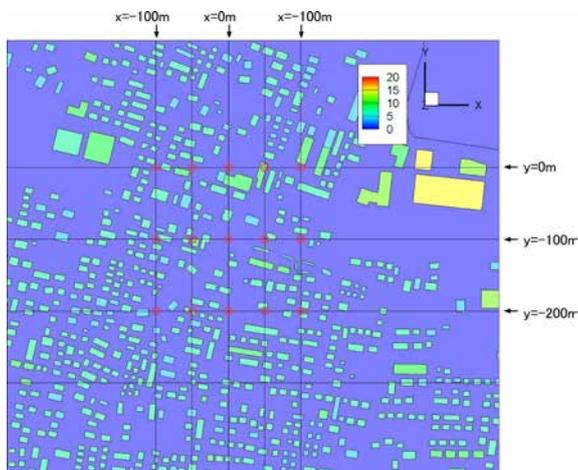
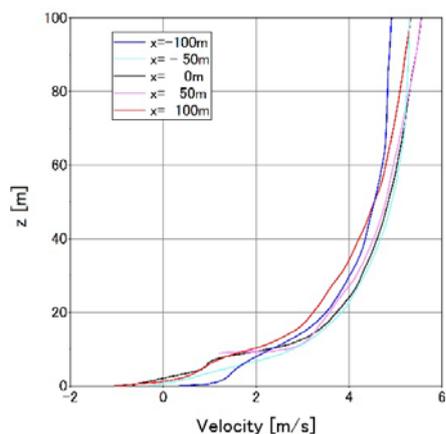
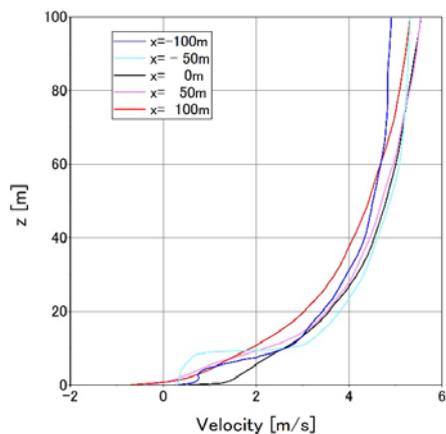


Fig. 2 Enlarged height map around $(x=0m, y=0m)$

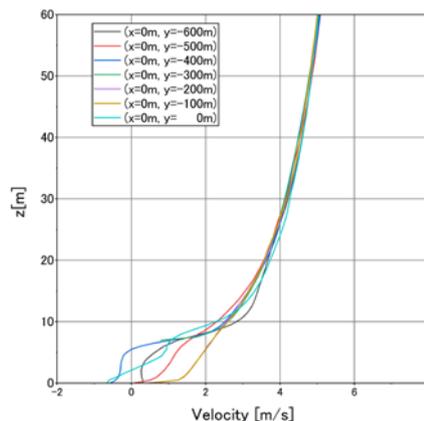


(a) $y=0m$

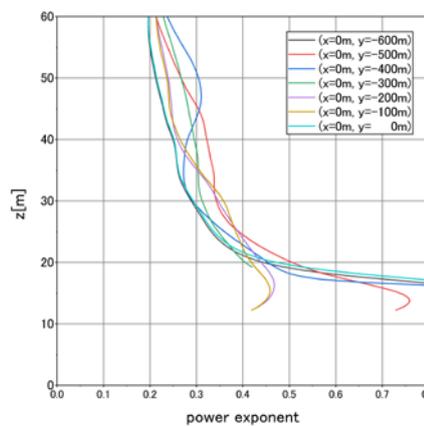


(b) $y=100m$

Fig. 3 Average velocity profiles along z-axis on $y=0m$ and $y=100m$



(a) average velocity



(b) power exponent

Fig. 4 Average velocity and power exponent profiles along z

個々の建物の影響は図 5 に示されるように、主に建物下流側における逆流・低風速域の生成に代表されるが、本解析対象のように建物が密集した場所では逆流・低風速域の回復も比較早いと考えられる。図 6 は $x=0m$ ライン上でそれぞれの高さ毎に平均風速値の空間変化を示しており、例えば $y=0m$ 地点の少し上流側にある周辺よりもやや高い建物付近では、高さ 24m 付近の風速にまで建物が影響している様子が確認できるが、この影響は流れ方向には比較的狭い範囲に留まっており、建物が密集かつ建物高さが均一なケースでは、個々の建物の影響が下流側遠方まで及ぼす可能性は小さいと考えられる。Table 1 は図 6 に示した風速の空間分布に対する代表的な統計量を示しており、建物の平均高さの概ね 2 倍となる高さ 16m で標準偏差/平均値=0.03, 最大値/平均値=1.06 と、領域全体としては比較的高い一様性が得られていることが分かる。

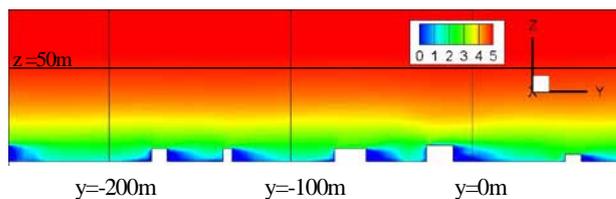


Fig. 5 Average velocity distribution on $x=0m$

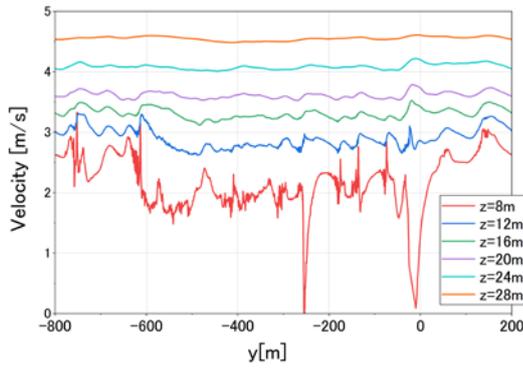


Fig. 6 Spatial fluctuations of average velocity at each height

Table 1 Statistics of spatial variation on average velocity

z[m]	Average (V_{av})	Standard deviation (σ)	Max (V_{max})	σ/V_{av}	V_{max}/V_{av}
4	1.28	0.74	3.00	0.58	2.34
8	2.18	0.44	3.33	0.20	1.53
12	2.90	0.16	3.31	0.06	1.14
16	3.31	0.09	3.53	0.03	1.06
20	3.62	0.06	3.79	0.02	1.05
24	3.88	0.05	4.04	0.01	1.04
28	4.09	0.05	4.22	0.01	1.03
32	4.26	0.04	4.34	0.01	1.02
36	4.42	0.04	4.49	0.01	1.02
40	4.55	0.03	4.61	0.01	1.01

(2) 風速の変動成分における空間相関

風速の変動成分における空間の一様性を明らかにするため、図 2 の赤丸地点の中から風速変動を比較すると共にこれらの相関を評価する。図 7 はスパン方向の 3 地点 ($x=0m, 100m, 200m$, いずれも $y=0m, z=20m$) の風速時系列と地点間の相関係数を示している。これより明らかにスパン方向に 100m 離れると相関はほとんど無いと言える。平均風速場でも図 3 に示されるようにスパン方向の離隔距離 100m で有意な差が見られたように、スパン方向の空間的な相関は低いと考えられる。

図 8 は流れ方向の 3 地点 ($y=0m, -100m, -200m$, いずれも $x=0m$) の風速時系列と地点間の相互相関関数を高さ毎 ($z=40m, 20m, 12m$) に示している。ここで、相互相関関数は次式で定義される指標であり、2 つの時系列データ $p(t), q(t)$ が時間遅れを有している場合の相関を定量化したものとなる⁽³⁾。

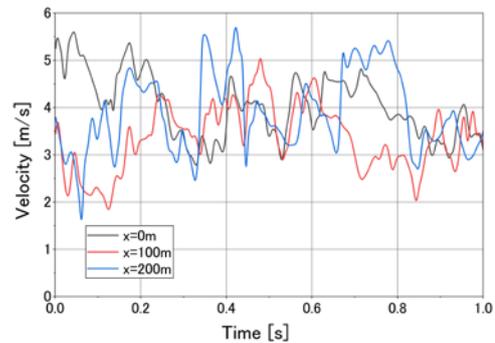
$$C_{pq}(\tau) = \overline{p(t)q(t+\tau)} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t)q(t+\tau) dt \quad (1)$$

図 8 における相互相関関数のグラフは横軸が 2 データ間の時間遅れ (τ)、縦軸が 2 データの時間軸を τ だけずらした時の相関係数となる。相互相関関数のピークの位置が $\tau = 0$ からずれば、2 地点間を渦が伝播するのに要する時間を示しており、2 地点の離隔距離に応じてピーク位置は変わってくる。また、高さによって移流速度が異なるため、相互相関関数のピークの位置は高さによっても変化する。

図 8 より、流れ方向の相関はスパン方向に比べて強く、高さ 40m では離隔距離 100m でも相互相関関数が 0.8 となって

いる。ただし、離隔距離の増加と共に相互相関関数は小さくなる。また、高さによっても相互相関関数は大きく異なり、地上に近づくほど相関は小さくなる。建物高さ近傍以下では個々の建物の影響が強くなるため、風上からの伝播する渦と建物によって生じる渦が混合することで、流れ方向の相関が小さくなると考えられる。

図 9 は ($x=0m, y=0m$) 地点における高さ毎の風速変動を示しており、これらの各高さ間の相関係数を図 10 に示す。また、表 2 には風速時系列データの代表的な統計量を示す。図 9 より下層域と上層域とでは明らかに時系列の類似性が異なっていることが分かる。相関係数は、高さ 28m 以上の領域では高低差 4m で相関係数は概ね 0.9 以上、高低差 8m で概ね 0.7 以上となる一方、高さ 20m 以下では、高低差 4m で相関係数は概ね 0.8 以下、高低差 8m で概ね 0.5 以下となっており、地上に近くなるほど高さ間の相関が小さい。また、表 2 に示されるように地表に近いほど変動成分は大きくなるため、平均風速の低下ほど瞬間的な風速は弱くならないが、高さ間の相関が弱まることは高さ方向に同時に風圧のピーク値が作用する可能性が低いことを示している。

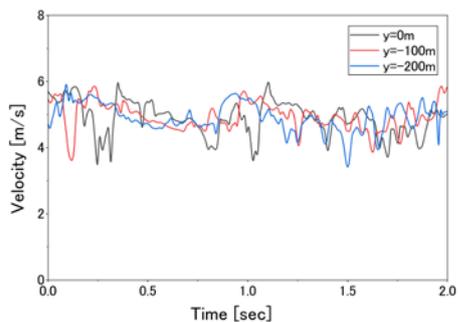


Comparison	Correlation factor
x=0m vs x=100m	-0.02
x=0m vs x=200m	-0.11
x=100m vs x=200m	0.05

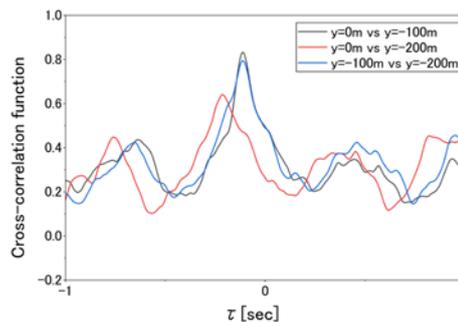
Fig. 7 Comparison of velocity time series in span direction

4. まとめ

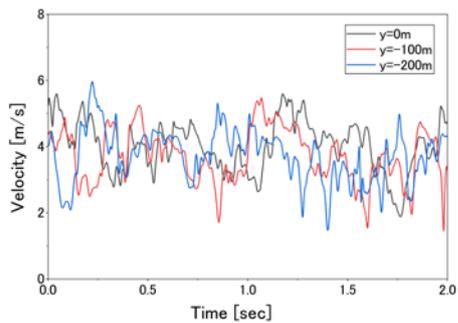
- (1) 実際の低層住宅地域の構造物を再現した体系で、LES による非定常計算を行い、都市キャノピ低層部における風速場の空間的な分布特性と変動成分における空間的な相関を評価した。
- (2) 平均風速場の空間的な一様性は、相対的にスパン方向には低く、流れ方向に高いことが示された。ただし、個々の建物による直接的な効果が大きくなる高さ (概ね建物高さの 2 倍以下) では高さが低くなるに従って流れ方向の非一様性も強くなる。特に建物下流側近傍では建物の 2 倍程度まで局所的に平均風速が若干強まる場合も有り得る。
- (3) 風速の変動成分における空間相関は、相対的にスパン方向には低く、流れ方向に高い。また、高さ方向の相関は地上に近くなるほど小さくなる。地表付近では変動成分自体は大きくなるが、高さ方向の相関が弱まるため、高さ方向に同時に瞬間的な強い風圧が作用する可能性は小さいと考えられる。



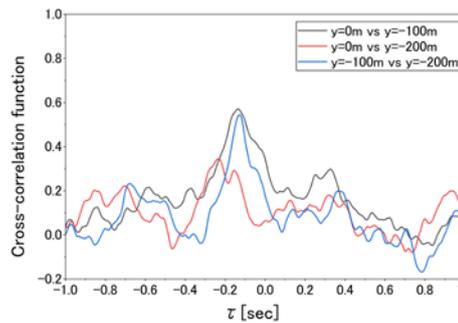
(a) Time series at z=40m



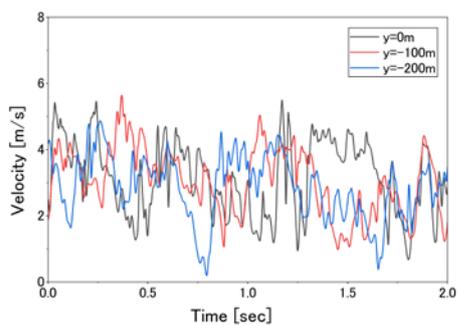
(b) Cross-correlation function at z=40m



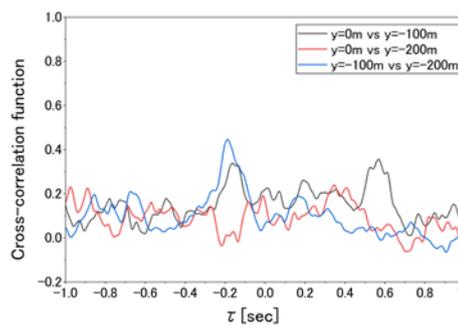
(c) Time series at z=20m



(d) Cross-correlation function at z=20m

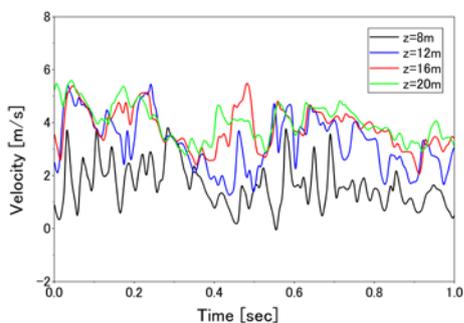


(e) Time series at z=12m

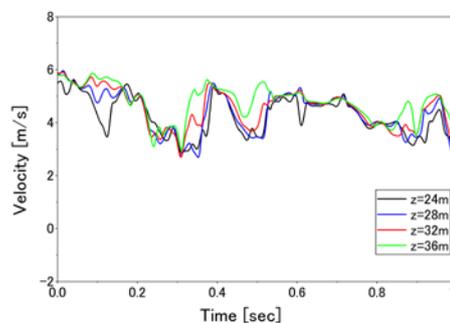


(f) Cross-correlation function at z=12m

Fig. 8 Comparison of velocity time series and cross-correlation function in stream-wise direction



(a) z=8m~20m



(b) z=24m~36m

Fig. 9 Comparison of velocity time series in height direction

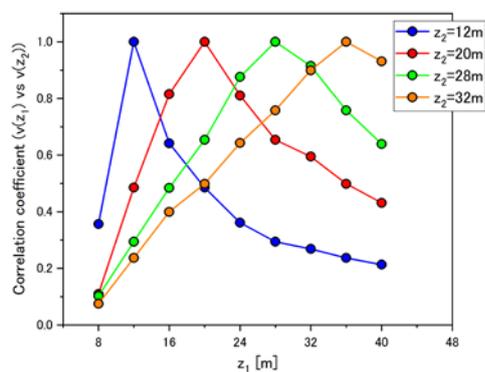


Fig. 10 correlation coefficient of velocity time series in height direction

Table 2 Statistics of velocity time series

z[m]	Average (V _{av})	Standard deviation (σ)	Max (V _{max})	σ/V _{av}	V _{max} /V _{av}
8	1.36	0.73	4.19	0.53	3.08
12	2.86	0.98	5.87	0.34	2.05
16	3.42	0.86	5.88	0.25	1.72
20	3.73	0.82	5.76	0.22	1.54
24	3.99	0.81	5.95	0.20	1.49
28	4.20	0.81	6.27	0.19	1.49
32	4.34	0.78	6.02	0.18	1.39
36	4.49	0.76	6.21	0.17	1.38
40	4.61	0.74	6.18	0.16	1.34

参考文献

- (1) Kanda, M., Inagaki, A., Miyamoto, T., Gryschka, M., Raasch, S., "A New Aerodynamic Parametrization for Real Urban Surfaces," *Boundary-Layer Meteorol*, vol.148 (2013), pp.357-377.
- (2) 日本建築学会, "建築物荷重指針・同解説," (2015).
- (3) 前田, 牧野, "大気乱流の平均流方向性分の統計的性質に関する研究," 日本建築学会論文報告集第 287 号 (1980).