

平成 29 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：屋外環境

研究期間：平成 29 年度

課題番号：172009

研究課題名（和文）：市街地内通風性能と運動エネルギーの散逸量に基づく風下側街区の風環境に係る外部環境負荷の同時評価モデルの開発

研究課題名（英文）：A proposal of concurrent evaluation method of environmental load to leeward area based on pedestrian-level wind environment and total kinetic energy dissipation

研究代表者：石田 泰之

交付決定額（当該年度）：250,000 円

1. 研究の背景と目的

- 1) 我国のコンパクトシティやスマートシティへの取り組み、アジア新興国などにおける急速な都市開発による都市の高層・高密度化の流れは止まることなく進められている。これにより街区内部に弱風域が形成され、都市温暖化や大気汚染を助長する結果を生んでいる。これに対し街区内部に新鮮で冷涼な空気を取り入れる、所謂「風の道」に関する数多くの研究が行われ、我国では国土交通省発行のヒートアイランド現象緩和に向けた都市づくりガイドラインにも「風の道を活用した都市づくり」という項目が盛り込まれるなど、実市街地の開発プロジェクトにおいても問題への関心が高まっている。
- 2) しかし、その何れも開発街区内部の風環境にのみ目を向けたものであり、対象街区からは外部の環境にあたる風下側に位置する街区への悪影響(外部環境負荷)に着目した研究は極めて少ない。

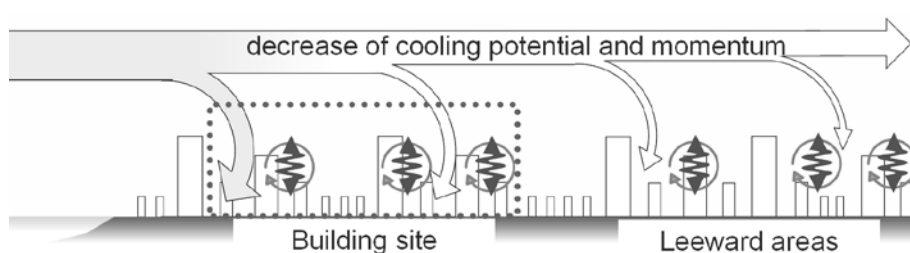


図 1 対象市街地(Building site)の風下側に存在する市街地が受ける風環境に関する負荷

- 3) そこで本研究では、風下側の街区の風通しを阻害する(風速を低下させる)因子も「外部環境負荷」の一つと考え、市街地形態の変更が対象街区内部の風通しと風環境に係る外部環境負荷へ及ぼす影響を定量評価するとともに、対象街区内部の風通しと風環境に係る外部環境負荷を同時評価する指標の検討を行う。

2. 研究の方法

- 1) エネルギーカスケード機構に基づき、対象街区に流入する運動エネルギーの減少量(エネルギー散逸率 ϵ)を用い風下側街区の通風阻害をもたらす外部環境負荷を定義する。
- 2) 建物を模した直方体群が整列する街区モデルを対象に、LES(Large-Eddy Simulation)を実施し、外部環境負荷を定量的に分析する。その際、風洞実験及び高精度な解析手法である DNS の結果と比較することで本解析の精度を検証する。
- 3) 平衡状態の流れ場において市街地形状が外部環境負荷に及ぼす影響を分析するため、水平方向には周期境界条件を課した解析を実施する。その上で、流れ場の駆動力に関するスタディを実施する。
- 4) 適切な解析条件を検討し、評価手法を開発すると同時に、街区のパラメータを系統的に変化させることで外部環境負荷の増減の傾向を把握し、負荷の多寡に影響を与える要因を解明する。
- 5) 以上の知見から、対象街区内部の環境改善と外部環境に対する負荷を同時評価する。

3. 研究成果

1) 周期境界条件における流れ場の駆動方法の違いが運動エネルギー収支構造に及ぼす影響

平衡状態の流れ場での評価を行うため、主流及び主流直交方向の解析境界に周期境界条件を課した LES を行った。平行平板間乱流を始めとする周期境界条件を課した解析では、主流方向に一定の圧力勾配を与えることで流れを駆動する手法が一般的に用いられる。一方、都市境界層では Constant Flux Layer の成立が仮定されることが多く、この場合、静圧勾配による流れの駆動は適切ではない。

そこで、静圧勾配により流れを駆動する手法と Constant Flux Layer を想定し上空境界に運動量を付加することで流れを駆動する手法を用いた LES をそれぞれ実施し、都市空間の運動エネルギー収支構造に及ぼす影響を分析した。

エネルギー収支は LES の結果から各種統計量を取得し表 1 の収支式各項に基づき算出した。ここで、 K_{GS} は Grid Scale の平均運動エネルギー、 k_{GS} は Grid Scale の乱流エネルギー、 $(K_{GS}+k_{GS})$ はこれらの和である全運動エネルギーである。

収支を評価する仮想閉空間 Control Volume (C.V.) は、主流及び主流直交方向においては解析領域幅、鉛直方向には 1 セル分の幅とし、鉛直方向に計 81 の C.V. を設定した。その上で、各 C.V. において運動エネルギーの収支を評価した。

表 1 Grid Scale の運動エネルギー収支式

Equations for mean kinetic energy K_{GS} balance

$$\begin{aligned}
 0 = & \underbrace{-\int_S \langle \bar{u}_j \rangle K_{GS} n_j dS}_{\text{Advection term}} - \underbrace{\int_V \left(-\langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \right) dV}_{\text{Dissipation term by Reynolds stress } (-P_k)} - \underbrace{\int_S \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle \langle \bar{u}_i \rangle n_j dS}_{\text{Transport term by Reynolds stress}} - \underbrace{\int_S \frac{\langle \bar{p} \rangle}{\rho} \langle \bar{u}_i \rangle n_i dS}_{\text{Pressure work term}} \\
 & - \underbrace{\int_S \langle \bar{u}_i \rangle \frac{\langle \tau_y \rangle}{\rho} n_j dS}_{\text{SGS diffusion term}} + \underbrace{\int_S \left(\nu \frac{\partial K_{GS}}{\partial x_j} \right) n_j dS}_{\text{Viscous diffusion term}} - \underbrace{\int_V \left(-\frac{\langle \tau_y \rangle}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \right) dV}_{\text{SGS energy dissipation rate}} - \underbrace{\int_V \left(\nu \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \right) dV}_{\text{Viscous dissipation term}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Equations for turbulent kinetic energy k_{GS} balance

$$\begin{aligned}
 0 = & \underbrace{-\int_S \langle \bar{u}_j \rangle k_{GS} n_j dS}_{\text{Advection term}} + \underbrace{\int_V \left(-\langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \right) dV}_{\text{Production term } (P_k)} - \underbrace{\int_S \left(\frac{1}{2} \langle \bar{u}'_j \bar{u}'_i \bar{u}'_i \rangle \right) n_j dS}_{\text{Transport term by turbulent velocity fluctuations}} - \underbrace{\int_S \frac{\langle \bar{p}' \rangle}{\rho} \langle \bar{u}'_i \rangle n_i dS}_{\text{Pressure diffusion term}} \\
 & - \underbrace{\int_S \langle \bar{u}'_i \rangle \frac{\langle \tau'_y \rangle}{\rho} n_j dS}_{\text{SGS diffusion term}} + \underbrace{\int_S \left(\nu \frac{\partial k_{GS}}{\partial x_j} \right) n_j dS}_{\text{Viscous diffusion term}} - \underbrace{\int_V \left(-\frac{\langle \tau'_y \rangle}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{u}'_i \rangle}{\partial x_j} \right) dV}_{\text{SGS energy dissipation rate}} - \underbrace{\int_V \left(\nu \frac{\partial \langle \bar{u}'_i \rangle}{\partial x_j} \frac{\partial \langle \bar{u}'_i \rangle}{\partial x_j} \right) dV}_{\text{Viscous dissipation term}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Equations for total kinetic energy $(K_{GS}+k_{GS})$ balance

$$\begin{aligned}
 0 = & \underbrace{-\int_S \langle \bar{u}_j \rangle (K_{GS} + k_{GS}) n_j dS}_{\text{Advection term}} - \underbrace{\int_S \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle \langle \bar{u}_i \rangle n_j dS}_{\text{Transport term by Reynolds stress}} - \underbrace{\int_S \left(\frac{1}{2} \langle \bar{u}'_j \bar{u}'_i \bar{u}'_i \rangle \right) n_j dS}_{\text{Transport term by turbulent velocity fluctuations}} - \underbrace{\int_S \frac{\langle \bar{p} \rangle}{\rho} \langle \bar{u}_i \rangle n_i dS}_{\text{Pressure term (Pressure work + Pressure diffusion)}} \\
 & - \underbrace{\int_S \langle \bar{u}_i \rangle \frac{\langle \tau_y \rangle}{\rho} n_j dS}_{\text{SGS diffusion term}} + \underbrace{\int_S \left(\nu \frac{\partial (K_{GS} + k_{GS})}{\partial x_j} \right) n_j dS}_{\text{Viscous diffusion term}} - \underbrace{\int_V \left(-\frac{\langle \tau_y \rangle}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \right) dV}_{\text{SGS energy dissipation rate}} - \underbrace{\int_V \left(\nu \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \right) dV}_{\text{Viscous dissipation term}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

解析は表 2 に示す Case-SU である。なお、各ケースとも平均建物高さは H で等しい。
 なお、解析条件は表 3 の通りとした。

表 2 解析ケース

Case	Case-RU	Case-SU
Layout		
Layout	<u>Regular</u>	<u>Staggered</u>
Building height	<u>Uniform (=10.0(H))</u>	<u>Uniform (=10.0(H))</u>
Case	Case-RN	Case-SN
Layout		
Layout	<u>Regular</u>	<u>Staggered</u>
Building height	<u>Non-uniform</u>	<u>Non-uniform</u>

表 3 LES の解析条件

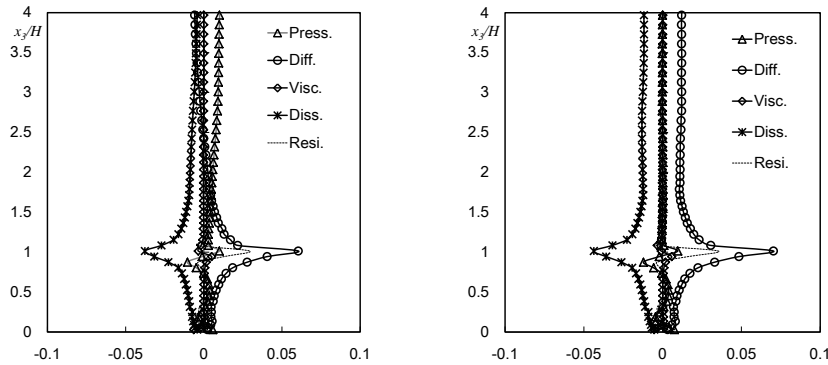
Sub-grid scale model	The coherent structure Smagorinsky model ¹⁾
Boundary conditions of building surfaces and ground	Werner and Wengle's approach ²⁾ was adopted, in which a linear or 1/7 power law distribution of the instantaneous velocity was assumed.
Time advancement	The second-order Adams–Bashorth for convection term, Crank–Nicolson for diffusion term
Spatial derivative	Second-order central difference
Algorithm	SMAC method

1) Kobayashi: Physics of Fluids, 17(4), 045104, 2005

2) Werner, Wengle: Proc. 8th Symp. on Turbulent shear Flows, 19-4, pp.155-158, 1991

図2に Case-SU の全運動エネルギー収支を示す。なお、Case-Press.は圧力勾配により流れを駆動させたケース、Case-Moment は上空境界に運動量を付与することで流れを駆動したケースの結果である。

ここから、建物上空にあたる $x_3/H > 1.0$ おいて Case Press.では圧力項 (Press.) の、Case Moment.では乱流拡散 (Diff.) の働きでエネルギーが供給され、両ケースとも建物高さ(H)付近で乱流拡散と散逸 (Diss.) がバランスする。特に、Case-Moment.では、建物上空での乱流拡散によるエネルギー供給がほぼ一様に発生しており Constant Flux が形成されている様子が確認できる。



(1) Case-Press. (2) Case-Moment.

図2 全運動エネルギー($K_{GS}+k_{GS}$) 収支の鉛直構造

2) 対象市街地の風下側街区の通風障害をもたらす外部環境負荷の定義

図3は、Grid Scale における全運動エネルギーが熱エネルギーに変換されるまでのエネルギーカスケード機構の模式図である。同図は平岡ら³⁾を参考に作成したものである。

着目する市街地の風下側領域の風環境は、着目する市街地内において全運動エネルギーがどの程度散逸するか、つまり、風下側市街地に風が到達した時に利用できる運動エネルギーはどの程度残っているか、また、風下側領域へどのような性状(例えば、乱れの程度)の風が侵入するか依存すると考えられ、即ち、図3に示す全体のプロセスを考える必要があると考えられる。

上記から本研究では、風下側街区の通風障害をもたらす対象市街地の外部環境負荷を、対象市街地の影響を受けて失われる運動エネルギーの総量、つまり、運動エネルギー散逸総量 ((1)式における SGS energy dissipation と Viscous dissipation のそれぞれの総量の和) によって定義する。

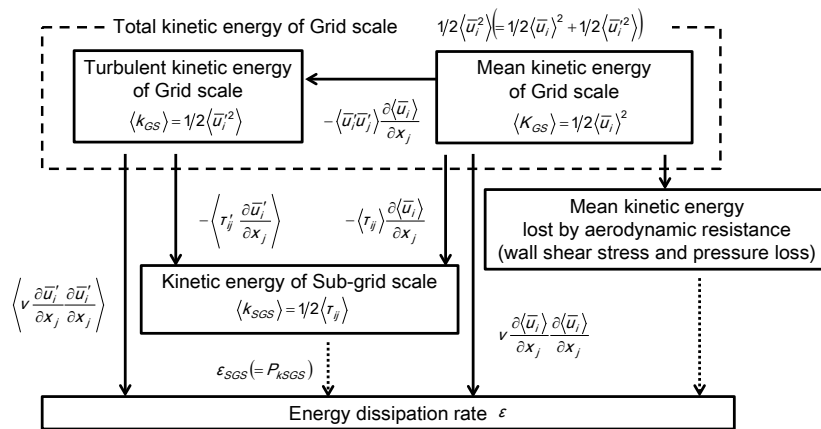


図3 Grid Scale の運動エネルギーカスケード (3)を基に作成)

3) 市街地形態が市街地内の風環境及び運動エネルギーの散逸総量に及ぼす影響

① 市街地形態が歩行者レベルの空間平均風速に及ぼす影響

市街地形態の変更が、地表付近における平均風速の空間平均値に及ぼす影響を分析した。解析ケースはアスペクト比 α_v 、グロス建蔽率 λ_p 、粗度立面積密度 λ_f を系統的に変化させた計 14 のケースを対象に LES を実施した。 α_v は 0.5、1.0、1.5、2.0 の 4 種類、 λ_p は 9~44%、 λ_f は 5~44% の範囲で設定した。

なお本節では、前節の Case-Press. と同様の解析条件を用いた。Case-Press. および Case-Moment. の比較結果から、駆動力付与方法の違いが平均風速分布に及ぼす影響が極めて小さいことを確認している(本報告書では結果は割愛)。

平均風速の評価に関して、本研究では菊本ら⁴⁾が整理した(4)式で定義される mean-vector speed V_{mv} 及び(5)式で定義される effective speed V_{es} を用いた。

$$\text{mean vector speed } V_{mv} = \sqrt{2K} = \sqrt{\langle u_i \rangle \langle u_i \rangle} \quad (4)$$

$$\text{effective speed } V_{es} = \sqrt{2K + 2k} = \sqrt{\langle (u_i + u_i')^2 \rangle} \quad (5)$$

図 3 に λ_p と地表付近の歩行者高さにおける V_{mv} の空間平均値(以降 $\overline{V_{mv}}$) の関係を示す。 λ_p が等しく α_v が異なるケース間で、 $\overline{V_{mv}}$ が異なっている。そこで、立面形状の影響を加味することができる λ_f と $\overline{V_{mv}}$ の関係を整理すると(図 4)、全てのケースが弓状の分布に沿う結果を示した。ここから、地表付近の歩行者高さにおける平均風速の空間平均値を特徴づける形状パラメータとして、 λ_p よりも λ_f の方が適しているといえる。

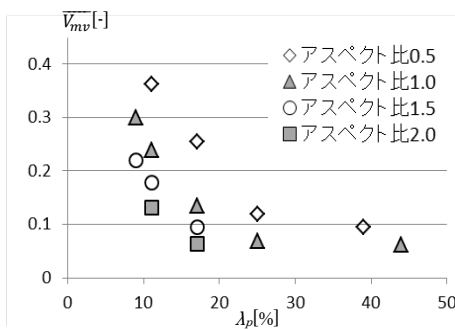


図 3 λ_p と $\overline{V_{mv}}$ の関係

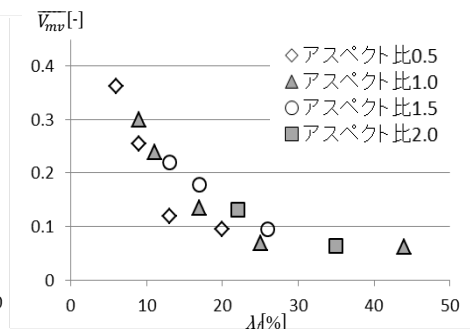


図 4 λ_f と $\overline{V_{mv}}$ の関係

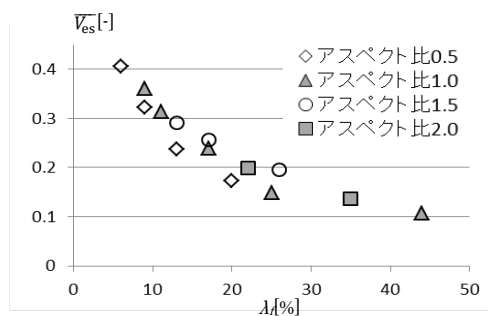


図 5 λ_f と $\overline{V_{es}}$ の関係

次に λ_f と地表付近の歩行者高さにおける V_{es} の空間平均値(以降 $\overline{V_{es}}$) の関係を示す(図 5)。図 4($\overline{V_{mv}}$) と比較すると、ケース間の値のばらつきが小さく相関性が高いことが分かる。 $\overline{V_{mv}}$ と $\overline{V_{es}}$ の差は k の影響であり、この影響が特に顕著であったのは $\lambda_f = 15 \sim 25\%$ 付近であった。以上により、地表付近の歩行者高さにおける風環境の平均的な性状は λ_f と $\overline{V_{es}}$ の関係から整理できる可能性が示された。

3) 市街地形態が市街地内の風環境及び運動エネルギーの散逸総量に及ぼす影響

② 市街地形態が全運動エネルギー及び全運動エネルギーの散逸総量に及ぼす影響

次に、市街地形態の変更が、エネルギー散逸率の総量及び歩行者レベルの全運動エネルギーに及ぼす影響を分析した。解析ケースは表 2 に示す 4 ケースである。

なお、本節では、運動エネルギーの輸送・散逸を Constant Flux Layer の成立条件下において評価する為に、Case-Moment. と同様の解析条件を用いた。

まず、地表付近における全運動エネルギーを比較した。

歩行者高さを $0.1H$ と仮定し、地表付近における運動エネルギー総量値を $0 < x_3/H < 0.1$ の積分値で定義した。結果を表 4 に示す。

なお、平均運動エネルギー総量 E_{K-ped} 、乱流エネルギー総量 e_{k-ped} は(6),(7)式で定義される。

$$E_{K-ped} = \frac{\int_0^{Lx1} \int_0^{Lx2} \int_0^{0.1H} K_{GS} dx_1 dx_2 dx_3}{Lx1 \cdot Lx2} \quad (6)$$

$$e_{k-ped} = \frac{\int_0^{Lx1} \int_0^{Lx2} \int_0^{0.1H} k_{GS} dx_1 dx_2 dx_3}{Lx1 \cdot Lx2} \quad (7)$$

ここから全運動エネルギー($E_{K-ped} + e_{k-ped}$)は、Case_RU(整列・一様)で最も高く、最も低い Case_SU(千鳥・一様)の約 1.9 倍であった。

表 4 地表付近における運動エネルギー総量($\times 10^4[-]$)

Case	Case_RU	Case_RN	Case_SU	Case_SN
E_{K-ped}	1.67	1.27	0.56	0.79
e_{k-ped}	0.99	1.03	0.79	0.90
$E_{K-ped} + e_{k-ped}$	2.66	2.29	1.36	1.69
$\frac{e_{k-ped}}{E_{K-ped} + e_{k-ped}}$	0.37	0.44	0.58	0.54

表 5 に $0 < x_3/H < 7$ の全運動エネルギーのエネルギー散逸の総量 ε_Σ の値を示す。

なお、 ε_Σ は(5)式で定義する。

$$\varepsilon_\Sigma = \frac{\int_0^{Lx1} \int_0^{Lx2} \int_0^{7H} \varepsilon dx_1 dx_2 dx_3}{Lx1 \cdot Lx2} \quad (8)$$

$$\varepsilon = -\nu \left\langle \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\rangle - \left\langle \frac{\tau_{ij}}{\rho} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\rangle \quad (9)$$

ここから、エネルギー散逸総量 ε_Σ は Case_RU(整列・一様)で最も低く、建物高さが一様から非一様となる、あるいは建物配置が整列から千鳥状となると値が増加する。Case_RU(整列・一様) ε_Σ は、最も ε_Σ の高い Case_SN(千鳥・非一様)の 1.8 倍程度の値となった。また、Case_RN(整列・非一様)と Case_SU(千鳥・一様)のエネルギー散逸総量 ε_Σ はほぼ同等であった。

表 5 $0 < x_3/H < 7$ のエネルギー散逸総量の比較

Case	Case_RU	Case_RN	Case_SU	Case_SN
ε_Σ	0.21	0.31	0.31	0.38

4) 地表付近における全運動エネルギー総量とエネルギー散逸総量の同時評価

上空風の持つ運動エネルギーが地表付近まで輸送される過程で少なからず運動エネルギーは散逸する。従って、運動エネルギー散逸量が少なく且つ地表付近における運動エネルギー量が多い市街地形態が望ましく、これを比較評価するために(10)式による評価を行った(表 6)。

$$\frac{(E_{K-ped} + e_{k-ped})}{\varepsilon_{\Sigma}} = \frac{\int_0^{Lx1} \int_0^{Lx2} \int_0^{0.1H} (K_{GS} + k_{GS}) dx_1 dx_2 dx_3}{\int_0^{Lx1} \int_0^{Lx2} \int_0^{7H} \varepsilon dx_1 dx_2 dx_3} \quad (10)$$

表 6 $(E_{K-ped} + e_{k-ped})$ と ε_{Σ} の比 ($\times 10^{-3}[-]$)

Case	Case_RU	Case_RN	Case_SU	Case_SN
$\frac{E_{K-ped} + e_{k-ped}}{\varepsilon_{\Sigma}}$	1.26	0.72	0.43	0.45

Case_SU(千鳥・一様)の値が最も低く、運動エネルギーの散逸が地表付近の運動エネルギー増加に効果的に寄与していない形状であることが分かる。また、建物配置が整列である場合、Case_RU(一様)と Case_RN(非一様)を比較すると、建物高さが非一様であることによって値が減少するが、建物配置が千鳥状の場合には、Case_SU(一様)と Case_SN(非一様)の値はほぼ同等であることが分かる。

また、全運動エネルギーのエネルギー散逸の総量 ε_{Σ} (表 4) は、Case_RN(整列・非一様)と Case_SU(千鳥・一様)ではほぼ同等であったが、Case_RN(整列・非一様)は Case_SU(千鳥・一様)よりも地表付近における全運動エネルギー $(E_{K-ped} + e_{k-ped})$ の値が高く、 $((E_{K-ped} + e_{k-ped})/\varepsilon_{\Sigma})$ は Case_RN(整列・非一様)の方が約 1.6 倍高い値を示した。

4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

1. 石田 泰之, 大風 翼, 持田 灯, “LESによるエネルギー散逸量の算出とこれに基づく風環境に係る外部環境負荷の評価(その1) 周期境界条件における流れ場の駆動方法の違いが運動エネルギー収支構造に及ぼす影響の分析”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017.
2. Yasuyuki Ishida, Tsubasa Okaze and Akashi Mochida, “Analysis of the structure of kinetic energy transport and dissipation due to the effect of urban roughness”, Proceedings of International Workshop on Wind-Related Disaster and Mitigation, 2018.
3. 石田 泰之, 大風 翼, 持田 灯, “LESによるエネルギー散逸量の算出とこれに基づく風環境に係る外部環境負荷の評価(その2) 市街地形態が全運動エネルギー及び全運動エネルギーの散逸総量に及ぼす影響”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018.
4. 高田 一成, 瀧澤 幸大, 石田 泰之, 持田 灯, “市街地の歩行者高さにおける風環境を特徴づける形状パラメータに関する分析(その2) グロス建蔽率・粗度立面積密度と定義の異なる2つの平均風速の歩行者高さにおける空間平均値の関係”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018.

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

[図書] (計 0 件)

[その他, 産業財産権, ホームページ等] 無し

5. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 泰之(東北大学・大学院工学研究科・助手)

(2) 研究分担者

1. 張 偉栄(東京工芸大学(2018年4月現在: 北京工業大学))
2. 持田 灯(東北大学)
2. 新井千秋(東北大学)
3. 河西昌隆(東北大学)
4. 瀧澤幸大(東北大学)
5. 本間実季(東北大学)
6. 山本ミゲイル(東北大学)

6. 要約(Abstract)

市街地内通風性能と運動エネルギーの散逸量に基づく
 風下側街区の風環境に係る外部環境負荷の同時評価モデルの開発
 石田 泰之 (東北大学)

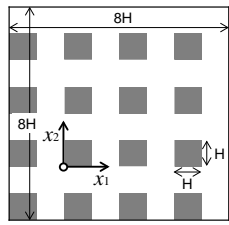
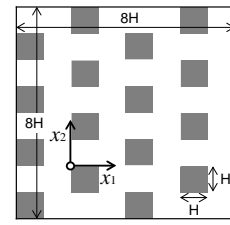
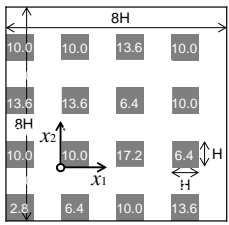
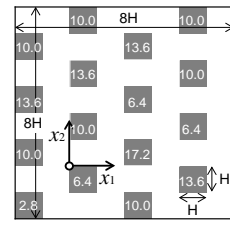
1. 目的

- 1) エネルギーカスケード機構に基づき、対象街区に流入する運動エネルギーの減少量(エネルギー散逸率 ε)を用い風下側街区の通風阻害をもたらす外部環境負荷を定義する。
- 2) 地表付近における風速、全運動エネルギー総量、エネルギー散逸総量を LES によって求め、市街地形態の変更がこれらの値に及ぼす影響を分析する。また、これらを同時評価する。

2. 成果

- 1) 地表付近の歩行者高さにおける風環境の平均的な性状は、粗度立面積密度と瞬時の風速の時間平均値から求まる平均風速との関係から整理できる可能性が示された。
- 2) 建物配置および建物高さの非一様性が、キャノピー層内の運動エネルギー量に及ぼす影響を定量評価し、建物高さの非一様化により地表付近の平均運動エネルギーが減少する一方で、乱流エネルギーが増加することを確認した。
- 3) また、建物配置および建物高さの非一様性が運動エネルギーの散逸総量に及ぼす影響を定量的に評価し、建物高さが一様から非一様となる、あるいは建物配置が整列から千鳥状となると値が増加することを確認した。
- 4) 地表付近における全運動エネルギー総量とエネルギー散逸総量を同時評価するための指標 ((1)式) を提案した。この指標により、市街地形態の変更により、運動エネルギーの散逸が地表付近の運動エネルギー増加に効果的に寄与するか否かの評価が可能となる。

表 1 解析ケース (グロス建蔽率 25%)

Case	Case-RU	Case-SU	Case-RN	Case-SN
Layout				
Layout	<u>Regular</u>	<u>Staggered</u>	<u>Regular</u>	<u>Staggered</u>
Height	<u>Uniform</u>	<u>Uniform</u>	<u>Non-uniform</u>	<u>Non-uniform</u>

$$\left(E_{K-ped} + e_{k-ped} \right) / \varepsilon_{\Sigma} = \frac{\int_0^{Lx1} \int_0^{Lx2} \int_0^{0.1H} (K_{GS} + k_{GS}) dx_1 dx_2 dx_3}{\int_0^{Lx1} \int_0^{Lx2} \int_0^{7H} \varepsilon dx_1 dx_2 dx_3} \quad (1)$$

表 2 $(E_{K-ped} + e_{k-ped})$ と ε_{Σ} の比 ($\times 10^{-3}$ [-])

Case	Case_RU	Case_RN	Case_SU	Case_SN
$\frac{E_{K-ped} + e_{k-ped}}{\varepsilon_{\Sigma}}$	1.26	0.72	0.43	0.45