論文

温度成層条件下の都市キャニオン流れに関する LES と標準 $k-\epsilon$ モデルの予測精度評価

Evaluation of Prediction Accuracy of LES and Standard $k-\epsilon$ Model for Flow within and above Urban Canyon under Various Conditions of Thermal Stratification

中島慶悟^{*1}

大岡龍三^{*2}

菊本英紀^{*3}

Keigo NAKAJIMA,

Ryozo OOKA,

Hideki KIKUMOTO

SUMMARY

Computational fluid dynamics (CFD) analysis using large-eddy simulation (LES) and standard $k-\epsilon$ model ($k-\epsilon$) was conducted for flow within and above urban canyon under various conditions of thermal stratification. The results of LES and $k-\epsilon$ were compared with the wind tunnel experiment to investigate the prediction accuracy of CFD analysis. $k-\epsilon$ failed to reproduce the spatial distribution of the mean wind velocity vector and mean temperature within the urban canyon compared with LES in unstable case. $k-\epsilon$ underestimated the Reynolds stress $\langle u_1' u_3' \rangle$ and turbulent heat flux $\langle u_3' T' \rangle$ within the urban canyon in unstable case. It is thought that the prediction accuracy of $k-\epsilon$ decreases because $k-\epsilon$ underestimates the exchange of momentum and heat within and above the urban canyon compared with LES and the wind tunnel experiment.

key words: LES, standard $k-\epsilon$ model, urban canyon, thermal stratification

1. はじめに

ヒートアイランド現象や大気汚染問題をはじめとする都市環境問題が深刻化している¹⁾。近年の計算機性能の向上により、Computational fluid dynamics (CFD)解析を用いた都市環境問題に対する環境影響評価、対策評価が行わ

れるようになってきた^{2),3)}。このような都市環境問題に対する CFD 解析の普及に伴い、日本建築学会では市街地における風環境問題に対する CFD 解析のガイドラインがまとめられている⁴⁾。そこでは様々な形状をもつ都市空間を対象として Reynolds-averaged Navier-Stokes equations

*1 東京大学大学院工学系研究科 大学院生
Graduate Student, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

*2 東京大学生産技術研究所 教授
Professor, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

*3 東京大学生産技術研究所 助教
Research Associate, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

(原稿受理年月日：2016年3月30日，採用決定年月日：2016年8月30日)

(RANS)モデルを用いた CFD 解析と風洞実験の結果を比較し、平均風速や乱流強度に関する CFD 解析の予測精度評価を行っている。ガイドラインでは主にビル風問題をはじめとする強風領域における風環境問題を対象としているが、ヒートアイランド現象や大気汚染問題については、熱や汚染物質が滞留しやすい都市キャノピーに形成される弱風領域においてより深刻化する。このような弱風領域においては強風領域と比較して浮力の影響が大きくなるため、CFD 解析においても温度成層の影響を考慮する必要がある。これまで、多くの研究により都市空間の流れ場に関する Large-eddy simulation (LES), RANS モデルを用いた CFD 解析の予測精度評価が行われている^{5)・8)}が、そのほとんどは温度成層の影響を無視する中立条件における検討であり、温度成層条件下の予測精度評価を行った事例は少ない。義江ら⁹⁾は不安定条件の都市空間の流れ場、温度場に関する予測精度評価を行い、不安定条件においては LES と比較して RANS モデルの予測精度が低下する結果を示している。しかし、安定条件も含む温度成層条件下における CFD 解析の予測精度評価はほとんど行われておらず、温度成層が CFD 解析の予測精度に及ぼす影響については未だ不明な点が多く存在する。また、乱流フラックスの評価は RANS モデルの予測精度に大きく影響を与える要素であるが、平均風速、平均温度のみならず乱流フラックスまで風洞実験と比較した事例はあまり見られない。これは風洞実験において乱流フラックスまで測定することが容易ではないためであると考えられるが、RANS モデルの改良のためには乱流フラックスについても風洞実験と比較し、そのモデル化の精度について検討を行う必要がある。

本検討では不安定条件、安定条件を含む温度成層条件下の都市空間の流れ場、温度場に関する CFD 解析の予測精度評価を行う。高密度市街地を模擬した都市街区モデルを対象として LES, RANS モデルを用いた CFD 解析を行い、流れ場、温度場に関する解析結果を風洞実験と比較する。なお、本検討では RANS モデルの乱流モデルは最も一般的な標準 $k-\epsilon$ モデル($k-\epsilon$)を対象とする。

2. 数値解析手法

2. 1 解析対象の概要

図 1, 図 2 にそれぞれ LES, $k-\epsilon$ の解析領域の概要、図 3 に解析対象である都市キャニオンの概要を示す。本検討では、上原ら^{10), 11)}の風洞実験を参照し、高密度市街地を模擬した都市街区モデルを解析対象とした。各辺の寸法が $H(x_1) \times H(x_2) \times H(x_3)$ ($H=100\text{mm}$) の立方体の建物モデルブ

ックを x_1 方向に H , x_2 方向に $0.5H$ の間隔で x_1 方向に 10 列配置し、都市街区モデルを作成した。都市街区モデルの建蔽率は 33%である。LES を行う際には、都市街区モデルへの接近流を作成するために、都市街区モデルの風上側に各辺の寸法が $H(x_1) \times H(x_2) \times 0.5H(x_3)$ の粗度ブロックを x_1 方向に H , x_2 方向に H の間隔で千鳥格子に 50 列配置した。本検討では、上原らの風洞実験と同様に 5 列目、6 列目の建物モデルブロックの間に形成される都市キャニオンを解析対象とした。なお、特に断らない限り LES で統計量を求める際には、 x_2 方向の同じ位置での統計量を平均して示す。

2. 2 解析条件の概要

表 1, 表 2 にそれぞれ LES, $k-\epsilon$ の解析条件の概要、表 3 に各 Case の温度成層条件を示す。本検討では、オープンソース CFD 解析ソフトウェアである OpenFOAM(version2.1.1)を用いて解析を行った。LES の Sub-grid scale (SGS)モデルには標準 Smagorinsky モデルを用い、Smagorinsky 定数 C_s は 0.12, SGS Prandtl 数 Pr_{SGS} は 0.7 とした。LES で統計量を求める際の平均化時間は実時間 t で 60s, $x_3/H=3.0$ における x_1 方向平均風速 $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$, 建物モデルブロック高さ H により定義した無次元化時間 t^* ($t^* = \langle u_1 \rangle_{(3H)}/H$) で 750 とした。LES の解析領域における流入境界条件は x_1 方向風速が $u_1=1.5\text{m/s}$, 温度が $T=T_{\text{air}}$ の一様流とした。 $k-\epsilon$ の乱流 Prandtl 数 Pr_t は 0.9 とした。乱流エネルギー輸送方程式には浮力生産項 G_k を組み込み、散逸率輸送方程式には Viollet 型のモデル¹²⁾を用いた。 $k-\epsilon$ の x_1 方向平均風速、平均温度、乱流エネルギーの流入境界条件には、上原らの風洞実験の値を与えた。散逸率の流入境界条件には、Tominaga ら¹³⁾にならない、式(1)を用いて乱流エネルギーの生産項、散逸項が釣り合う局所平衡の仮定から推定した値を与えた。本検討では、温度成層条件は中立、不安定、弱安定、強安定の 4 つの Case について検討を行う。各 Case のバルクリチャードソン数(式(2))はそれぞれ不安定では 0.3, 弱安定では 0.1, 強安定では 0.3 である。本検討のバルクリチャードソン数は実際の都市空間においては、建物高さ 10m, 気流温度 30°C, 風速 5.0m/s とした場合、地表面温度が不安定では約 38°C, 弱安定では約 27°C, 強安定では約 22°C の条件にそれぞれ相当する。

図 4 に各 Case の LES で作成した都市街区モデルへの接近流の鉛直プロファイルを示す。風洞実験の結果から温度成層条件が不安定になるほど地表面付近と上空の間の運動量、熱の交換が活発になり、上空における x_1 方向平均風速、平均温度の x_3 方向勾配が小さくなることが分かる。また、温度成層条件が不安定になるほど x_1 方向風速変動

図1 解析領域の概要(LES)

Fig. 1 Analysis model of LES

図2 解析領域の概要(k-ε)

Fig. 2 Analysis model of k-ε

図3 都市キャニオンの概要

Fig. 3 Urban canyon

表1 LESの解析条件

Table 1 Analysis condition of LES

SGS モデル	標準 Smagorinsky モデル($C_s=0.12$, $Pr_{SGS}=0.7$) van Driest 型減衰関数
解析領域	$165H(x_1) \times 12H(x_2) \times 20H(x_3)$
解析格子	解析領域: $1340(x_1) \times 192(x_2) \times 128(x_3)$ 都市キャニオン内: $16(x_1) \times 16(x_2) \times 16(x_3)$
時間積分	PISO
時間離散化スキーム	2次精度陰解法
空間離散化スキーム	2次精度中心差分
流入境界条件	$u_1=1.5m/s$ (一様流), $T=T_{(in)}$
流出境界条件	自由流出
側面境界条件	Periodic
上空境界条件	風速: Free slip, $u_3=0$, 温度: 断熱
地表面境界条件	
建物モデルブロック	
表面境界条件	Wall function (Spalding's law)

表2 k-εの解析条件

Table 2 Analysis condition of k-ε

解析領域	$45H(x_1) \times 1.5H(x_2) \times 20H(x_3)$
解析格子	解析領域: $460(x_1) \times 24(x_2) \times 128(x_3)$ 都市キャニオン内: $16(x_1) \times 16(x_2) \times 16(x_3)$
時間積分	SIMPLE
移流項 離散化スキーム	1次精度風上差分
流入境界条件	風速, 温度, 乱流エネルギー: 風洞実験値 散逸率: 乱流エネルギー輸送方程式の 局所平衡から推定した値 ¹³⁾
流出境界条件	自由流出
側面境界条件	Periodic
上空境界条件	風速: Free slip, $u_3=0$, 温度: 断熱
地表面境界条件	
建物モデルブロック	
表面境界条件	風速: Wall function (Generalized logarithmic law) 温度: Wall function (Jayatilke P-function)

$$\varepsilon(x_3) \equiv -\langle u_1' u_3' \rangle \frac{d\langle u_1 \rangle}{dx_3} \equiv C_\mu^{1/2} k(x_3) \frac{d\langle u_1 \rangle}{dx_3} \quad (1)$$

$$R_{bulk} = g(3H) \left(\langle T \rangle_{(3H)} - \langle T \rangle_{(0)} \right) / \left(\langle \langle T \rangle \rangle_{(3H)} + 273 \right) \langle u_1 \rangle_{(3H)}^2 \quad (2)$$

rms (root mean square)値が大きくなった。LES では x_1 方向平均風速, 平均温度, x_1 方向風速変動 rms 値のいずれについてもこのような各 Case の相違の定性的な傾向は再現された。 x_1 方向平均風速については不安定, 強安定においては風洞実験と良く一致したが, 中立, 弱安定においては風洞実験より小さくなった。平均温度については上空においてはすべての Case で良く一致したが, 粗度ブロック群内においては安定で平均温度を過小評価する傾向が見られた。 x_1 方向風速変動 rms 値については上空において不安定, 強安定で風洞実験より大きくなった。以上のように LES で作成した都市街区モデルへの接近流については温度成層による各 Case の相違の定性的な傾向は再現されたが, 部分的に風洞実験との相違が大きくなる領域が見られた。したがって, 以下の考察においては風洞実験, LES の都市街区モデルへの接近流の鉛直プロファイルに上記のような相違があることに留意する必要がある。

3. 数値解析結果

温度成層条件下の高密度市街地を模擬した都市街区モ

表 3 温度成層条件
Table 3 Condition of thermal stratification

	Case1	Case2	Case3	Case4
温度成層条件	中立	不安定	弱安定	強安定
地表面温度 $T_{(0)}$		78.9°C	20.6°C	20.5°C
気流温度 $T_{(air)}$		19.8°C	38.4°C	77.6°C
バルクリチャーソン数 R_{bulk}		-0.3	0.1	0.3

図 4 都市街区モデルへの接近流の鉛直プロファイル($\langle u_1 \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(0)}$ により無次元化)
Fig. 4 Vertical profile of approaching flow for urban block model (normalized by $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(0)}$)

デルを対象としたLES, k- ϵ の流れ場, 温度場に関する解析結果を風洞実験の結果と比較し, LES, k- ϵ の予測精度について検討を行う。

3. 1 平均風速・平均温度の比較

図 5, 図 6 に都市キャニオン風上側 $x_1/H=0.25$, 都市キャニオン中心 $x_1/H=0$, 都市キャニオン風下側 $x_1/H=0.25$ における x_1 方向平均風速, 平均温度の鉛直プロファイルを示す。 x_1 方向平均風速, 平均温度はそれぞれ $x_3=3H$ における x_1 方向平均風速 $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$, 平均温度 $\langle T \rangle_{(3H)}$, 地表面温度 $\langle T \rangle_{(0)}$ により無次元化した^{注1)}。風洞実験の結果から温度成層条件が不安定になるほど地表面付近と上空の間の運動量, 熱の交換が活発になり, 上空における x_1 方向平均風速, 平均温度の x_3 方向勾配が小さくなる事が分かる。LES, k- ϵ とともに上空におけるこのような傾向は見られたが, k- ϵ は風洞実験, LES と比較して各 Case の上空における x_1 方向平均風速の相違が小さく, 温度成層による浮力の効果が十分に再現されなかった。LES も風洞実験と比較すれば, 各 Case の上空における x_1 方向平均風速の相違が小さくなったが, これは LES で作成した接近流の x_1 方向平均風速の鉛直プロファイルが風洞実験とやや異なっ

ていることが影響していると考えられる。都市キャニオン内における x_1 方向平均風速, 平均温度については不安定になるほど k- ϵ は LES と比較して風洞実験との対応が悪くなった。また, 安定になるほど LES, k- ϵ の風洞実験との対応は同程度となり, 不安定と比較して LES の風洞実験との対応が悪くなった。一般的に安定になるほど乱れのスケールが小さくなり, LES では SGS モデルの影響が大きくなる。しかし, 標準 Smagorinsky モデルでは浮力の効果¹⁴⁾が組み込まれていないため, 安定になるほど LES は風洞実験との対応が悪くなったと考えられる。さらに, 強安定においてはバルクリチャーソン数が 0.3 であり, 臨界リチャーソン数¹⁵⁾である 0.25 を超えている。つまり, 強安定においては流れが層流化したため, LES の風洞実験との対応が悪くなったと考えられる。

図 7, 図 8 に $x_2/H=6.0$ の都市キャニオン鉛直断面における平均風速ベクトル, 平均温度の空間分布を示す。また, 注 2) の補図 1, 補図 2 に上原らの風洞実験の都市キャニオン中央の鉛直断面における平均風速ベクトル, 平均温度の空間分布を示す。平均風速ベクトルについては温度成層条件が不安定になるほど LES, k- ϵ の都市キャニオン内

i) $x_3/H = 0$ から 3.0 まで表示

ii) $x_3/H = 0$ から 1.0 まで表示

図5 都市キャニオンにおける x_1 方向平均風速の鉛直プロファイル($\langle u_1 \rangle_{(3H)}$ により無次元化)
Fig. 5 Vertical profile of streamwise mean wind velocity within and above urban canyon (normalized by $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$)

図6 都市キャニオンにおける平均温度の鉛直プロファイル($\langle T \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(0)}$ により無次元化)
Fig. 6 Vertical profile of mean temperature within and above urban canyon (normalized by $\langle T \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(0)}$)

図7 都市キャニオン中央の鉛直断面($x_2/H=6.0$)における平均風速ベクトルの空間分布($\langle u_1 \rangle_{(3H)}$ により無次元化)
 Fig. 7 Spatial distribution of mean wind velocity vector within and above urban canyon at vertical center section
 (normalized by $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$)

図8 都市キャニオン中央の鉛直断面($x_2/H=6.0$)における平均温度の空間分布($\langle T \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(0)}$ により無次元化)
 Fig. 8 Spatial distribution of mean temperature within and above urban canyon at vertical center section
 (normalized by $\langle T \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(0)}$)

図9 都市キャニオンにおける平均スカラー風速のCFD解析値と風洞実験値の相関($\langle u_1 \rangle_{(3H)}$ により無次元化)
Fig.9 Relationship between CFD analysis and wind tunnel experiment of mean wind velocity within urban canyon (normalized by $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$)

図10 都市キャニオンにおける平均温度のCFD解析値と風洞実験値の相関($\langle T \rangle_{(3H)}, \langle T \rangle_{(0)}$ により無次元化)
Fig.10 Relationship between CFD analysis and wind tunnel experiment of mean temperature within urban canyon (normalized by $\langle T \rangle_{(3H)}, \langle T \rangle_{(0)}$)

に形成される循環渦の中心位置の相違が大きくなった。風洞実験ではいずれの温度成層条件においても都市キャニオン内の風下側建物直前の中央より少し高い位置に循

環渦の中心が形成されている。LESはこの傾向を再現できたが、k-εは強安定以外においてこの傾向を再現できなかった。強安定においてはk-εでも風洞実験、LESと同様

図 11 都市キャニオンにおけるスカラー平均風速の空間平均値($\langle u_1 \rangle_{(3H)}$)により無次元化)

Fig. 11 Spatial average of mean wind velocity within urban canyon (normalized by $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$)

の位置に循環渦の中心が形成された。平均温度については強安定においてはLES, k-εが同程度の値となったが、不安定になるほどk-εはLESと比較して都市キャニオン内における平均温度が小さくなった。都市キャニオン内における平均温度の空間分布はLESの方がk-εより風洞実験に近く、k-εでは風洞実験、LESと比較して循環渦により地表面から都市キャニオン風上側に輸送された熱が上空に放出されず、都市キャニオン内に滞留する傾向が見られた。

図 9, 図 10 にそれぞれ都市キャニオン内における平均スカラー風速, 平均温度のLES, k-εによる解析値と実験値の相関を示す。解析値と実験値の比較は図 3 に示す立面図の黒丸の位置で行った。平均スカラー風速についてはLES, k-εともに風洞実験との対応は同程度であり、温度成層条件が安定になるほど両者の風洞実験との対応が良くなった。前述のようにk-εではLESと比較して不安定になるほど都市キャニオン内における平均風速ベクトルの空間分布の予測精度が低下したが、都市キャニオン内における平均スカラー風速についてはLES, k-εの相違は小さかった。平均温度については不安定になるほどLES, k-εの相違が大きくなり、LESと比較してk-εの予測精度が低下した。

図 11, 図 12 にそれぞれ図 3 に示す立面図の黒丸の位置における平均スカラー風速, 平均温度のLES, k-εによる解析値, 実験値をそれぞれ平均した結果を示す。図 11, 図 12 の横軸はバルクリチャードソン数を示す。風洞実験の結果から温度成層条件が不安定になるほど都市キャニオン内外の運動量, 熱の交換が活発になり、都市キャニオン内における平均スカラー風速, 平均温度が大きくなることから分かる。LES, k-εともにこのような傾向は見られた。平均スカラー風速についてはLES, k-εともに風洞実験より小さく、不安定になるほど風洞実験との相違が大きくな

図 12 都市キャニオンにおける平均温度の空間平均値($\langle T \rangle_{(3H)}, \langle T \rangle_{(0)}$)により無次元化)

Fig. 12 Spatial average of mean temperature within urban canyon (normalized by $\langle T \rangle_{(3H)}, \langle T \rangle_{(0)}$)

った。平均温度については不安定になるほどLES, k-εの相違が大きくなり、k-εは風洞実験、LESと比較して都市キャニオン内における平均温度が小さくなった。これはk-εではLESと比較して都市キャニオン内外における熱の交換が十分に再現されなかったためであると考えられる。

以上の結果からk-εはLESと比較して温度成層条件が不安定になるほど都市キャニオン内における平均風速ベクトル, 平均温度の空間分布の予測精度が低下することが示された。

3. 2 乱れ性状の比較

図 13 から図 16 に都市キャニオン風上側 $x_1/H=-0.25$, 都市キャニオン中心 $x_1/H=0$, 都市キャニオン風下側 $x_1/H=0.25$ における x_1 方向風速変動 rms 値, x_3 方向風速変動 rms 値^{注3)}, レイノルズストレス $\langle u_1' u_3' \rangle$, 乱流熱フラックス $\langle u_3' T' \rangle$ の鉛直プロファイルを示す。これらの乱流統計量はそれぞれ $x_3=3H$ における x_1 方向平均風速 $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$, 平均温度 $\langle T \rangle_{(3H)}$, 地表面温度 $\langle T \rangle_{(0)}$ により無次元化した。なお, LESの解析結果についてはGrid scale (GS)成分のみを示す。

x_1 方向風速変動 rms 値, x_3 方向風速変動 rms 値について検討する。風洞実験の結果から温度成層条件が不安定になるほど x_1 方向風速変動 rms 値, x_3 方向風速変動 rms 値が大きくなることから分かる。上空においてはLES, k-εともにこのような傾向が見られたが、k-εはLESと比較して各Caseの相違が小さかった。また、不安定、強安定において、LESでは風洞実験と比較して上空の x_1 方向風速変動 rms 値がやや大きい、これはLESで作成した接近流の上空における x_1 方向風速変動 rms 値が風洞実験よりやや大きいことが影響していると考えられる。都市キャニオン内においては強安定以外でLES, k-εともに x_1 方向風速変動 rms 値, x_3 方向風速変動 rms 値を過小評価した。特に、k-εは都市キャニオン内における x_1 方向風速変動 rms 値, x_3

図 13 都市キャニオンにおける x_1 方向風速変動 rms 値の鉛直プロファイル($\langle u_1 \rangle_{(3H)}$ により無次元化)
Fig. 13 Vertical profile of streamwise turbulent intensity within and above urban canyon (normalized by $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$)

図 14 都市キャニオンにおける x_3 方向風速変動 rms 値の鉛直プロファイル($\langle u_1 \rangle_{(3H)}$ により無次元化)
Fig. 14 Vertical profile of vertical turbulent intensity within and above urban canyon (normalized by $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$)

方向風速変動 rms 値について各 Case の相違がほとんど見られず、不安定になるほど LES と比較して小さい値となった。k- ϵ では温度成層による浮力の効果が x_1 方向風速変動 rms 値、 x_3 方向風速変動 rms 値に与える影響をほとんど再現できなかったと考えられる。

レイノルズストレス $\langle u_1' u_3' \rangle$ 、乱流熱フラックス $\langle u_3' T' \rangle$ について検討する。風洞実験の結果から温度成層条件が不安定になるほどレイノルズストレス $\langle u_1' u_3' \rangle$ 、乱流熱フラックス $\langle u_3' T' \rangle$ の絶対値が大きくなり、運動量、熱の交換が活発になることが分かる。上空においては LES、k- ϵ とともにこのような傾向が見られたが、レイノルズストレス $\langle u_1' u_3' \rangle$ については k- ϵ は LES と比較して各 Case の相違が小さかった。都市キャニオン内のレイノルズストレス $\langle u_1' u_3' \rangle$ については LES、k- ϵ とともに強安定以外で過小評価

した。k- ϵ は各 Case の相違がほとんど見られず LES と比較して小さい値となり、温度成層による浮力の効果がレイノルズストレス $\langle u_1' u_3' \rangle$ に与える影響がほとんど再現されなかったと考えられる。都市キャニオン内の乱流熱フラックス $\langle u_3' T' \rangle$ については k- ϵ は風洞実験、LES と比較して過小評価する傾向が見られた。また、k- ϵ は地表面付近を除き、各 Case の相違がほとんど見られず、レイノルズストレス $\langle u_1' u_3' \rangle$ と同様に温度成層による浮力の効果が乱流熱フラックス $\langle u_3' T' \rangle$ に与える影響がほとんど再現されなかったと考えられる。

以上の結果から k- ϵ は風洞実験、LES と比較して温度成層条件が不安定になるほど都市キャニオン内における x_1 方向風速変動 rms 値、 x_3 方向風速変動 rms 値、レイノルズストレス $\langle u_1' u_3' \rangle$ 、乱流熱フラックス $\langle u_3' T' \rangle$ を過小評価す

図 15 都市キャニオンにおけるレイノルズストレス $\langle u_1'u_3' \rangle$ の鉛直プロファイル($\langle u_1 \rangle_{(3H)}$ により無次元化)
Fig. 15 Vertical profile of Reynolds stress $\langle u_1'u_3' \rangle$ within and above urban canyon (normalized by $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$)

図 16 都市キャニオンにおける乱流熱フラックス $\langle u_3'T \rangle$ の鉛直プロファイル($\langle u_1 \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(0)}$ により無次元化)
Fig. 16 Vertical profile of turbulent heat flux $\langle u_3'T \rangle$ within and above urban canyon (normalized by $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(3H)}$, $\langle T \rangle_{(0)}$)

る傾向があることが示された。つまり、 $k-\epsilon$ では風洞実験、LES と比較して不安定になるほど都市キャニオン内外における運動量、熱の交換が十分に再現されず、都市キャニオン内の平均風速ベクトル、平均温度の空間分布の予測精度の低下につながったと考えられる。

$k-\epsilon$ において風洞実験、LES と比較して浮力の効果が乱れに与える影響が再現されなかった原因について考察する。 $k-\epsilon$ では乱流エネルギー輸送方程式に浮力生産項 G_k (式(3))が組み込まれているが、浮力生産項 G_k は乱流熱フラックス $\langle u_3'T \rangle$ に依存する。しかし、前述のようにいずれのCaseにおいても $k-\epsilon$ では風洞実験、LESと比較して都市キャニオン内における乱流熱フラックス $\langle u_3'T \rangle$ が非常に小さく、ほとんど0に近い値となった。したがって、浮力生産項 G_k についても各Caseの相違が再現されず、浮力

の効果が風速変動 rms 値に与える影響が再現されなかったと考えられる。また、浮力生産項 G_k に各Caseの相違が再現されなかったため、乱流エネルギー、渦動粘性係数 ν_t についても各Caseの相違が再現されず、浮力の効果がレイノルズストレス $\langle u_1'u_3' \rangle$ 、乱流熱フラックス $\langle u_3'T \rangle$ に与える影響が再現されなかったと考えられる。以上の考察より、温度成層条件下の都市キャニオン流れにおいては、WET モデルなどにより乱流熱フラックス $\langle u_3'T \rangle$ のモデル化に浮力の効果を組み込み、浮力生産項 G_k の再現精度を向上する必要がある。野口ら¹⁶⁾、香月ら¹⁷⁾はWETモデルに基づいて、それぞれ乱流熱フラックス $\langle u_3'T \rangle$ 、レイノルズストレス $\langle u_1'u_3' \rangle$ のモデル化に浮力の効果を組み込んだ。これらのモデルを平板境界層流れに適用し、 $k-\epsilon$ と比較して平均風速、平均温度の予測精度に一定の改善が

見られることを示している。今後、これらのモデルを都市キャニオン流れに適用し、その予測精度について検討する予定である。

$$G_k = -g\beta(u_3'T') \quad (3)$$

4. まとめ

温度成層条件下の高密度市街地を模擬した都市街区モデルを対象として LES, k-ε を用いた CFD 解析を行い、その結果を風洞実験と比較した。以下、得られた知見をまとめる。

- ① k-ε では LES と比較して温度成層条件が不安定になるほど都市キャニオン内における平均風速ベクトル、平均温度の空間分布の予測精度が低下した。
- ② 強安定以外において LES, k-ε は都市キャニオン内の x_1 方向風速変動 rms 値, x_3 方向風速変動 rms 値を過小評価した。k-ε は都市キャニオン内における x_1 方向風速変動 rms 値, x_3 方向風速変動 rms 値について各 Case の相違がほとんど見られず、不安定になるほど LES と比較して小さい値となった。
- ③ k-ε は風洞実験, LES と比較して不安定になるほど都市キャニオン内におけるレイノルズストレス $\langle u_1'u_3' \rangle$, 乱流熱フラックス $\langle u_3'T' \rangle$ を過小評価する傾向が見られた。つまり、k-ε では風洞実験, LES と比較して都市キャニオン内外における運動量、熱の交換が十分に再現されず、都市キャニオン内の平均風速ベクトル、平均温度の空間分布の予測精度の低下につながったと考えられる。
- ④ k-ε では風洞実験, LES と比較して浮力の効果が乱れに与える影響が再現されなかった。これは乱流熱フラックス $\langle u_3'T' \rangle$ のモデル化に浮力の効果が組み込まれておらず、乱流エネルギー輸送方程式の浮力生産項 G_k の再現精度が低下したためであると考えられる。今後、WET モデルに基づいてレイノルズストレス $\langle u_1'u_3' \rangle$, 乱流熱フラックス $\langle u_3'T' \rangle$ のモデル化に浮力の効果を組み込み、都市キャニオン流れにおける予測精度について検討する予定である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金の基盤研究(S)「都市環境防災のための高解像度気象情報予測プラットフォームの構築」(課題番号：24226013, 研究代表者：大岡龍三)の助成を受けて行われたものである。ここに記して謝意を示す。なお、本研究は 2015 年度日本風工学会優秀修士論文

賞を受賞したものである。

記号表

x_i : 空間座標の 3 成分 u_i : 風速ベクトルの 3 成分
($i=1$: 主流方向, $i=2$: スパン方向, $i=3$: 鉛直方向)
 T : 温度 k : 乱流エネルギー ε : 散逸率
 ν_t : 渦動粘性係数 Pr_t : 乱流プラントル数
 P_k : 乱流エネルギーの生産項
 G_k : 乱流エネルギーの浮力生産項
 R_{bulk} : パルクリチャードソン数
 f : 変数 f の瞬時値 $\bar{f}$: 変数 f のフィルター平均値
 $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均値 f' : 変数 f の時間変動値

注

1) 本論文中の平均温度は $x_3=3H$ における平均温度 $\langle T \rangle_{(3H)}$, 地表面温度 $\langle T \rangle_{(0)}$ により無次元化した平均温度 $(\langle T \rangle - \langle T \rangle_{(0)}) / (\langle T \rangle_{(3H)} - \langle T \rangle_{(0)})$ を意味する。無次元化した平均温度 $(\langle T \rangle - \langle T \rangle_{(0)}) / (\langle T \rangle_{(3H)} - \langle T \rangle_{(0)})$ は温度成層条件に関わらず、地表面温度 $\langle T \rangle_{(0)}$ に近いほど 0 に近づき、 $x_3=3H$ における平均温度 $\langle T \rangle_{(3H)}$ に近いほど 1 に近づく。

2) 補図 1, 補図 2 に上原ら^{10), 11)}の風洞実験の都市キャニオン中央の鉛直断面における平均風速ベクトル、平均温度の空間分布をそれぞれ示す。

3) 持田ら¹⁸⁾にならない k-ε では式(A1), 式(A2)を用いて x_1 方向風速変動 rms 値, x_3 方向風速変動 rms 値を求めた。

$$\langle u_1'u_1' \rangle^{1/2} = \left(\frac{2}{3} k - 2\nu_t \frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_1} \right)^{1/2} \quad (A1)$$

$$\langle u_3'u_3' \rangle^{1/2} = \left(\frac{2}{3} k - 2\nu_t \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_3} \right)^{1/2} \quad (A2)$$

参考文献

- 1) 環境省, 「平成 26 年版環境・循環型社会・生物多様性白書」, 2014
- 2) 村上 周三, 大岡 龍三, 足永 靖信, 大黒 雅之, 谷本 潤, 持田 灯, 松縄 堅, 河野 孝昭, 「ヒートアイランド現象緩和に関する評価システム構築のための CFD による感度解析」, 日本建築学会技術報告集, 23, pp.241-246, (2006)
- 3) 加藤 信介, 黄 弘, 大岡 龍三, 蔣 太峰, 「CFD 解析による市街地における Visitation Frequency, Purging Flow Rate の解析 高架道路周辺換気効率の評価に関

- する研究」, 第 18 回風工学シンポジウム論文集, pp.93-98, (2004)
- 4) 日本建築学会, 「市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック ガイドラインと検証用データベース」, 日本建築学会, (2007)
- 5) Z. Xie, I. P. Castro, “LES and RANS for turbulent flow over arrays of wall-mounted obstacles”, *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 76, pp.291-312, (2006)
- 6) S.M. Salim, R. Buccolieri, A. Chan, S. D. Sabatino, “Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: Comparison between RANS and LES”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, pp. 103-113, (2011)
- 7) Y. Tominaga, T. Stathopoulos, “CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, pp. 340-348, (2011)
- 8) P. Gousseau, B. Blocken, T. Stathopoulos, G. J. F. van Heijst, “CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in down town Montreal”, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, pp. 428-438, (2011)
- 9) 義江 龍一郎, 野村 佳祐, 堅田 弘大, Guoyi JIANG, 「都市街区内の非等温流れ場における汚染物質拡散・熱拡散に関する風洞実験と LES」, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, pp. 61-66, (2012)
- 10) 上原 清, 村上 周三, 老川 進, 若松 伸司, 「温度成層流中のストリートキャニオン内の流れに関する LDV を用いた風洞実験 市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その 2」, 日本建築学会計画系論文集, 492, pp. 39-46, (1997)
- 11) 上原 清, 若松 伸司, 村上 周三, 「温度成層化した乱流境界層内の流れ場に関する LDV を用いた風洞実験」, 国立環境研究所, (1997)
- 12) P. L. Violette, “The modelling of turbulent recirculating flows for the purpose of reactor thermal-hydraulic analysis”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 99, pp. 365-377, (1987)
- 13) Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa, T. Shirasawa, “AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, pp. 1749-1761, (2008)
- 14) T. M. Eidson, “Numerical simulation of the turbulent Rayleigh-Benard problem using subgrid modelling”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 158, pp. 245-268, (1985)
- 15) T. Lyons, H. A. Panofsky, S. Wollaston, “The Critical Richardson Number and Its Implications for Forecast Problems”, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 3, pp. 136-142, (1964)
- 16) 野口 康仁, 村上 周三, 持田 灯, 富永 禎秀, 「都市の温熱環境の数値シミュレーション (その 3) k-ε モデルの乱流熱フラックスの評価への浮力効果の組み込み」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 65-66, (1994)
- 17) 香月 壮亮, 大岡 龍三, 高橋 岳生, 加藤 信介, 「様々な大気安定度での大気境界層発達に関する風洞実験と数値シミュレーション」, 日本建築学会環境系論文集, 640, pp.735-743, (2009)
- 18) 持田 灯, 村上 周三, 林 吉彦, 「立方体モデル周辺の非等方乱流場に関する k-ε モデルと LES の比較」, 日本建築学会計画系論文報告集, 423, pp. 23-31, (1991)

補図1 都市キャニオン中央の鉛直断面における平均風速ベクトルの空間分布($\langle u_1 \rangle_{(7H)}$ により無次元化)
(上原らの論文^{10),11)}より転載)

Additional Fig. 1 Spatial distribution of mean wind velocity vector within and above urban canyon at vertical center section
(normalized by $\langle u_1 \rangle_{(7H)}$)

補図2 都市キャニオン中央の鉛直断面における平均温度の空間分布($\langle T \rangle_{(7H)}$, $\langle T \rangle_{(0)}$ により無次元化)
(上原らの論文^{10),11)}より転載)

Additional Fig. 2 Spatial distribution of mean temperature within and above urban canyon at vertical center section
(normalized by $\langle T \rangle_{(7H)}$, $\langle T \rangle_{(0)}$)