

# 様々な温度成層条件下の都市キャニオン内外における LES と標準 k-ε モデルの比較

## Comparison between LES and standard k-ε model for flow within and above urban canyon under various thermal stratification

- 中島慶悟, 東大院, 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail: keigo-n@iis.u-tokyo.ac.jp
- 大岡龍三, 東大生研, 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail: ooka@iis.u-tokyo.ac.jp
- 菊本英紀, 東大生研, 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail: kkmt@iis.u-tokyo.ac.jp
- Keigo NAKAJIMA, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo
- Ryozo OOKA, IIS, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo
- Hideki KIKUMOTO, IIS, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo

Computational fluid dynamics (CFD) analysis using large-eddy simulation (LES) and standard k-ε model (k-ε) was conducted for flow within and above urban canyon under various conditions of thermal stratification. The results of LES and k-ε were compared with the wind tunnel experiment to investigate the prediction accuracy of CFD analysis. LES agreed with the wind tunnel experiment for the mean wind velocity and mean temperature. k-ε failed to reproduce the spatial distribution of the mean wind velocity and mean temperature within the urban canyon in unstable case. LES and k-ε agreed well with the wind tunnel experiment for the turbulent kinetic energy in stable case, although they underestimated it within the urban canyon in unstable case. k-ε also 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 and stable cases. It is thought that the prediction accuracy of k-ε decreases because k-ε underestimates the exchange of momentum and heat within and above the urban canyon compared with LES and the wind tunnel experiment.

### 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<sup>(1)</sup>。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ている<sup>(2)</sup>。<sup>(3)</sup>。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<sup>(4)</sup>。ガイドラインでは様々な都市空間を対象として Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)モデルを用いた CFD 解析と風洞実験の結果を比較し、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、今後 CFD 解析の普及が期待されるヒートアイランド現象や大気汚染問題は、熱や汚染物質が滞留しやすい都市キャニオン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、温度成層の影響を考慮する必要があると考えられる。これまで、ガイドラインを含む多くの研究により都市空間における CFD 解析の予測精度評価が行われている<sup>(5)</sup>、<sup>(6)</sup>、<sup>(7)</sup>、<sup>(8)</sup>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、様々な温度成層条件下の都市空間における CFD 解析の予測精度評価を行った事例は少ない。義江ら<sup>(9)</sup>により不安定条件の都市空間における CFD 解析の予測精度評価は行われているが、不安定条件だけではなく安定条件も含む様々な温度成層条件下の都市空間における CFD 解析の予測精度評価はほとんど行われておらず、温度成層が都市空間における CFD 解析の予測精度に及ぼす影響については不明な点が多く存在する。

そこで、本検討では不安定条件、安定条件を含む様々な温度成層条件下の都市空間における CFD 解析の予測精度評価を行った。高密度市街地を模擬した都市街区モデルを対象として Large-eddy simulation(LES)、RANS モデルを用いた CFD 解析を行い、その結果を風洞実験と比較した。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-ε モデル(k-ε)を対象とした。

### 2. 数値解析手法

#### 2. 1 解析対象の概要

Fig. 1、Fig. 2 にそれぞれ LES、k-ε の解析領域の概要、Fig. 3 に解析対象である都市街区モデルの概要を示す。本検討では、上原ら<sup>(10)</sup>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ロックを  $x_1$  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

Table 1、Table 2 にそれぞれ LES、k-ε の解析条件の概要、Table 3 に各ケース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(version 2.1.1)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 40s、 $x_3/H=3.0$  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 500 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  $T=T_{(air)}$  の一様流とし、解析対象である都市街区モデルへの接近流は上原らの風洞実験を参照し、都市街区モデルの風上側に粗度ブロックを配置することにより作成した。k-ε の乱流 Prandtl 数  $Pr_t$  は 0.9 とした。散逸率輸送方程式のモデルには Viollet 型のモデルを用いた。k-ε 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<sup>(11)</sup>にならい、式(1)

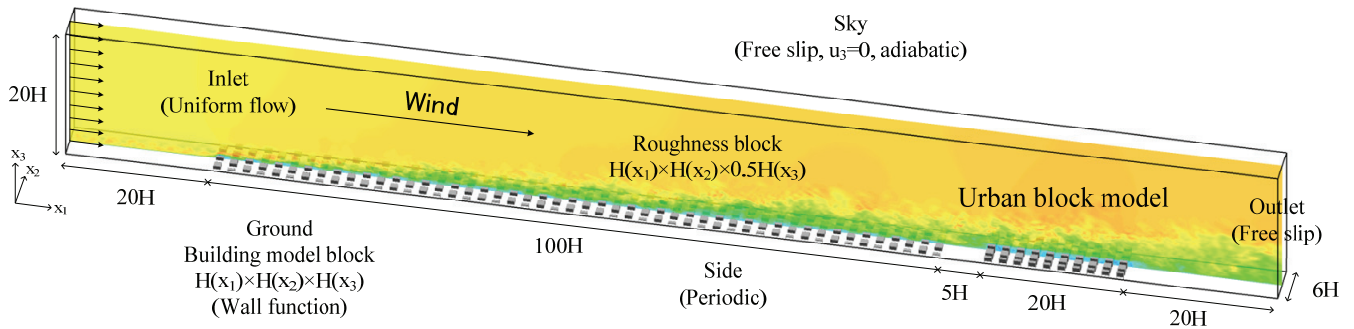


Fig. 1. Analysis model of LES.

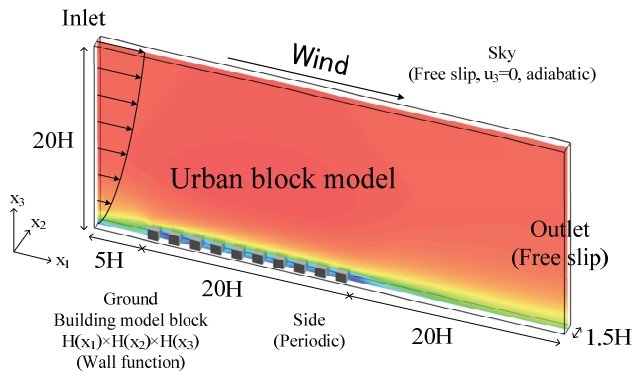


Fig. 2. Analysis model of k-ε.

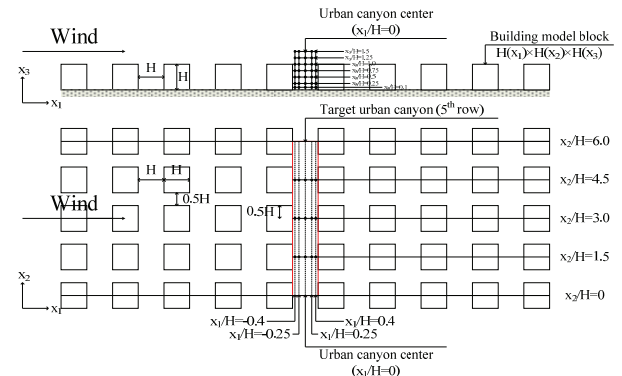


Fig. 3. Urban block model.

Table 1. Analysis condition of LES.

SGS model	Standard Smagorinsky model ( $C_s=0.12$ , $Pr_{SGS}=0.7$ ) van Driest damping function
Analysis domain	$165H(x_1) \times 6H(x_2) \times 20H(x_3)$
Analysis grid	Analysis domain: $1250(x_1) \times 72(x_2) \times 96(x_3)$ Within urban canyon: $12(x_1) \times 12(x_2) \times 12(x_3)$
Analysis algorithm	PISO
Time discretization scheme	2nd order implicit scheme
Space discretization scheme	2nd order central difference scheme
Inlet B.C.	$u_1=1.5\text{m/s}$ (Uniform flow), $T=T_{\text{air}}$
Outlet B.C.	Free slip
Side B.C.	Periodic
Top B.C.	Wind velocity: Free slip, $u_3=0$ , Temperature: Adiabatic
Ground B.C.	Wall function (Spalding's law)
Building model block B.C.	

Table 2. Analysis condition of k-ε.

Analysis domain	$45H(x_1) \times 1.5H(x_2) \times 20H(x_3)$
Analysis grid	Analysis domain: $370(x_1) \times 18(x_2) \times 96(x_3)$ Within urban canyon: $12(x_1) \times 12(x_2) \times 12(x_3)$
Analysis algorithm	SIMPLE
Space discretization scheme of convection term	1st order upwind scheme
Inlet B.C.	Wind velocity, temperature, turbulent kinetic energy: Wind tunnel experiment Dissipation rate: Estimated from local equilibrium of turbulent kinetic energy
Outlet B.C.	Free slip
Side B.C.	Periodic
Top B.C.	Wind velocity: Free slip, $u_3=0$ , Temperature: Adiabatic
Ground B.C.	Wind velocity: Wall function (Generalized logarithmic law) Temperature: Wall function (Jayatilke P-function)
Building model block B.C.	

Table 3. Condition of thermal stratification.

	Case1	Case2
Condition of thermal stratification	Unstable	Stable
Ground temperature $T_{(0)}$	78.9°C	20.5°C
Air temperature $T_{\text{air}}$	19.8°C	77.6°C
Bulk Richardson number $R_{\text{bulk}}$	-0.3	0.3

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

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

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、温度成層条件は不安定条件、安定条件の2ケースについて検討を行う。各ケースのバルクリチャードソン数(式(2))はそれぞれ不安定条件では0.3、安定条件では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15m、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条件では35°C、安定条件では25°Cの条件にそれぞれ相当する。

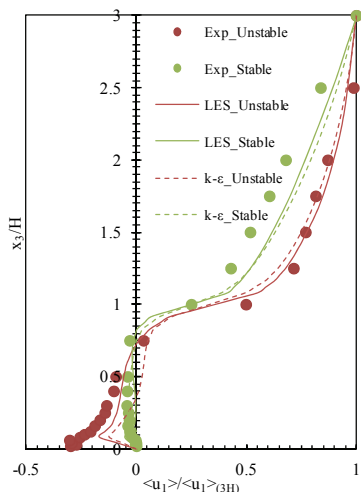


Fig. 4. Vertical profile of streamwise mean wind velocity at urban canyon center.

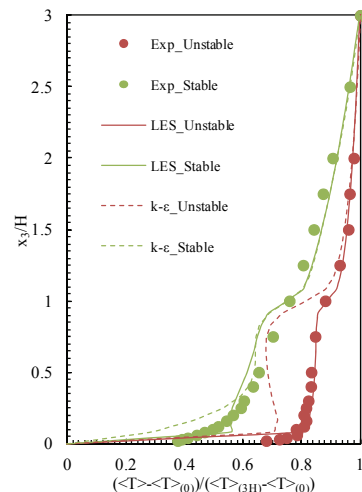


Fig. 5. Vertical profile of mean temperature at urban canyon center.

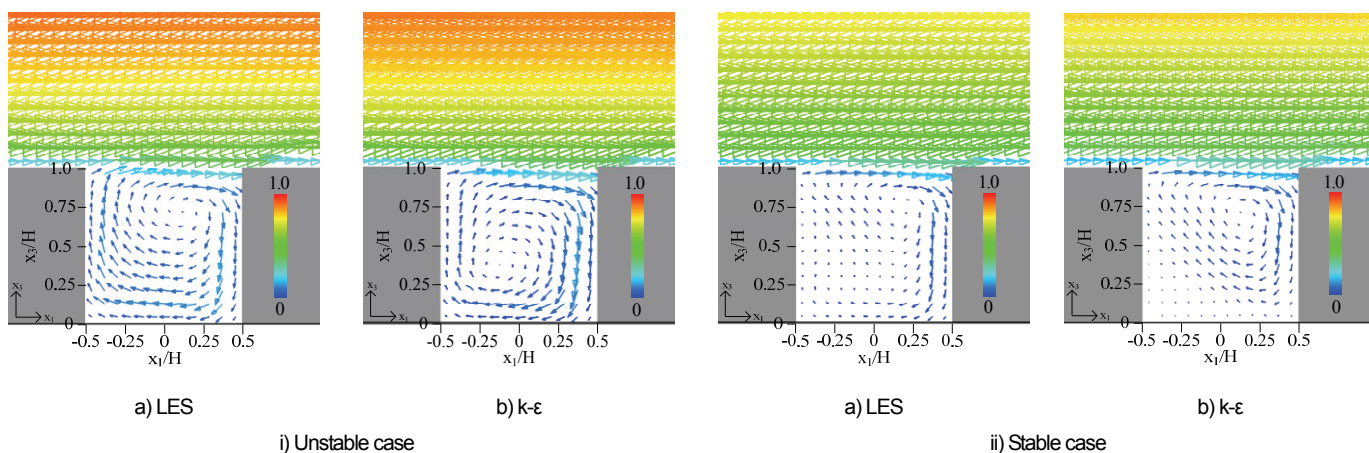


Fig. 6. Spatial distribution of mean wind velocity vector within and above urban canyon at vertical center section (normalized by  $\langle u_1 \rangle_{(3H)}$ ).

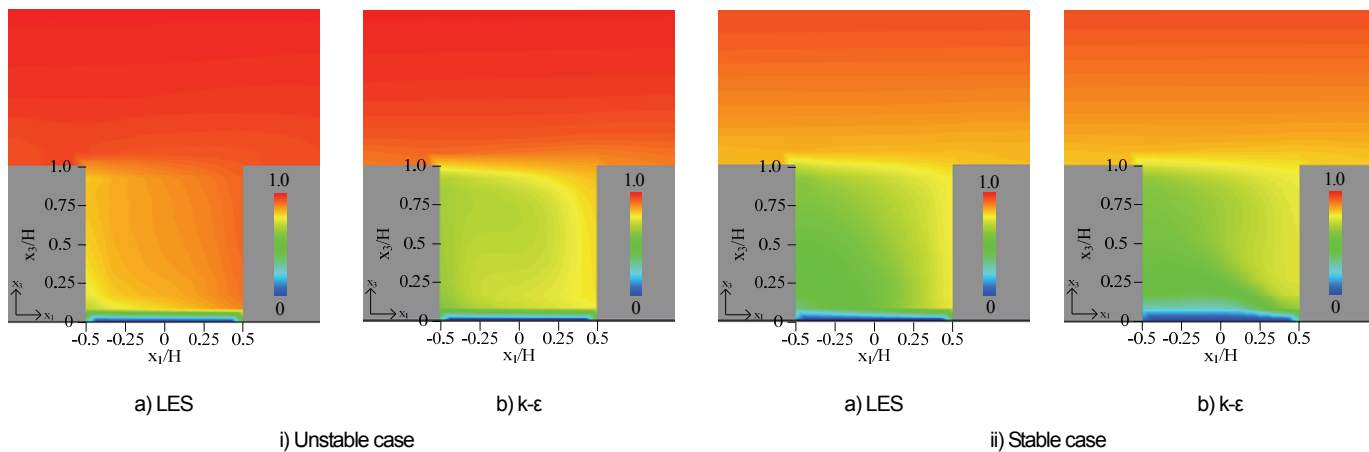


Fig. 7. Spatial distribution of mean temperature within and above urban canyon at vertical center section (normalized by  $\langle T \rangle_{(3H)} - \langle T \rangle_{(0)}$ ).

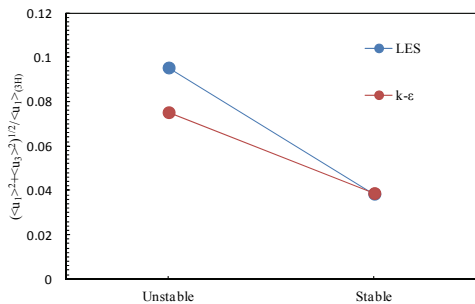


Fig. 8. Spatial average of mean wind velocity within urban canyon.

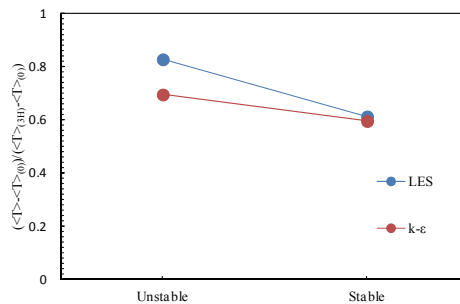


Fig. 9. Spatial average of mean temperature within urban canyon.

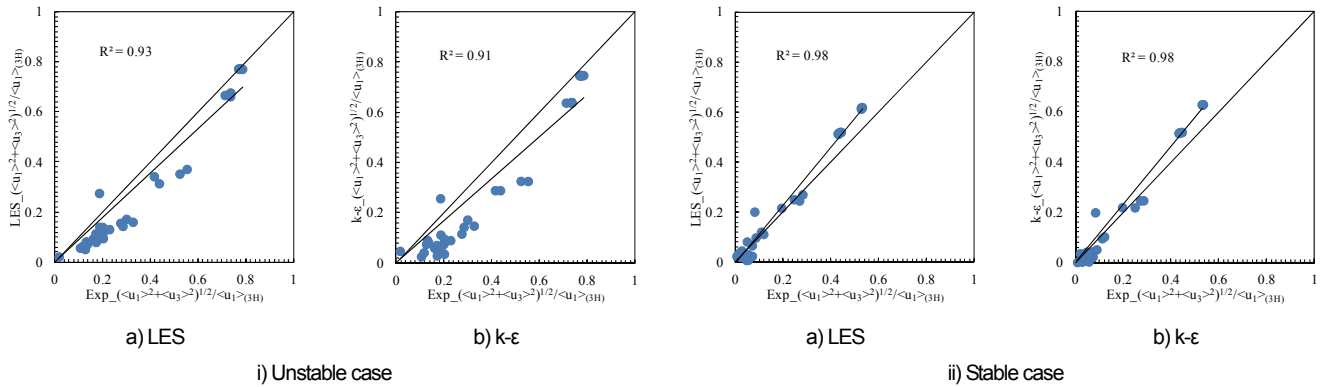


Fig. 10. Relationship between CFD analysis and wind tunnel experiment of mean wind velocity within and above urban canyon.

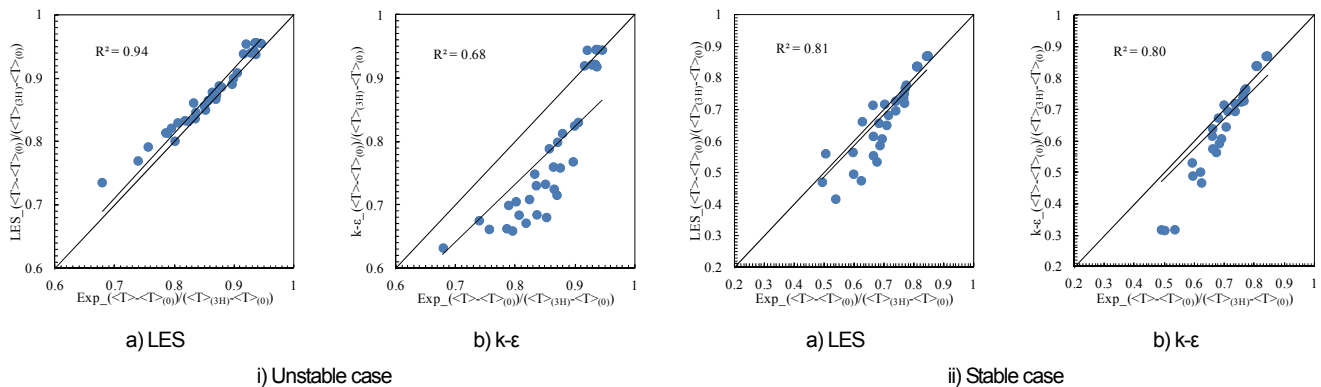


Fig. 11. Relationship between CFD analysis and wind tunnel experiment of mean temperature within and above urban canyon.

### 3. 数値解析結果

高密度市街地を模擬した都市街区モデルを対象とした LES、k-ε の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

Fig. 4、Fig. 5 にそれぞれ都市キャニオン中心( $x_1/H=0$ )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。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、平均温度の鉛直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再現できている。一方、都市キャニオン内においては、LES は温度成層条件に関わらず風洞実験と概ね一致しているが、k-ε は不安定条件において  $x_1$  方向平均風速、平均温度の風洞実験との相違が大きくなる。

Fig. 6、Fig. 7 にそれぞれ都市キャニオン内外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不安定条件において LES、k-ε の都市キャニオン内に形成される循環渦の中心位置が異なる。上原らの風洞実験では不安定条件においては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るとしており<sup>注</sup>、LES はこの傾向を再現できているのに対して k-ε は再現できていない。安定条件においては LES、k-ε の都市キャニオン内の循環渦の中心は概ね同じ位置に形成されており、上原らの風洞実験とも概ね一致している<sup>注</sup>。平均温度については安定条件においては LES、k-ε が同様の傾向を示すが、不安定条件においては k-ε は LES と比較して平均温度が低い。Fig. 8、Fig. 9 に都市キャニオン内における平均風速、平均温度の空間平均値を示す。温度成層条件が不安定になるほど地表付近と上空の間の運動量、熱の交換が活発になるため都市キャニオン内の平均風速、平均温度が高くなると考えら

れるが、LES、k-ε とともにこのような傾向は再現できている。安定条件においては LES、k-ε の平均風速、平均温度は概ね一致するが、不安定条件においては k-ε は LES と比較して平均風速が 21%、平均温度が 16% ずつ低い。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運動量、熱の交換が十分に再現されていないためであると考えられる。

Fig. 10、Fig. 11 に都市キャニオン内外における平均風速、平均温度の LES、k-ε による解析値と実験値の関係を示す。解析値と実験値の比較は Fig. 3 に示す立面図の黒丸の位置で行った。平均風速については温度成層条件に関わらず LES、k-ε とともに解析値と実験値の相関係数(決定係数)が 0.9 以上となっており、良く対応している。平均温度については不安定条件において k-ε の解析値と実験値の相関係数(決定係数)が 0.68 となり、k-ε の予測精度が低下する。

以上の結果から LES は温度成層条件に関わらず都市キャニオン内外における平均風速、平均温度の予測精度が高い。k-ε は安定条件においては平均風速、平均温度ともに比較的予測精度が高いが、不安定条件においては都市キャニオン内の平均風速の空間分布、平均温度の予測精度が低下する。

#### 3. 2 乱れ性状の比較

Fig. 12 に都市キャニオン中心における乱流統計量の鉛直プロファイルを示す。乱流エネルギーについては安定条件においては LES、k-ε とともに風洞実験と概ね一致しているが、不安定条件においては LES、k-ε とともに過小評価する。k-ε における乱流エネルギーの過小評価は渦動粘性係数の過小評価につながる可能性があり、平均風速の予測精度に影響を与えられられる。k-ε は LES、風洞実験と比較して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。つまり、k-ε では LES、風洞実験と比較して都市キャニオン内外における運動

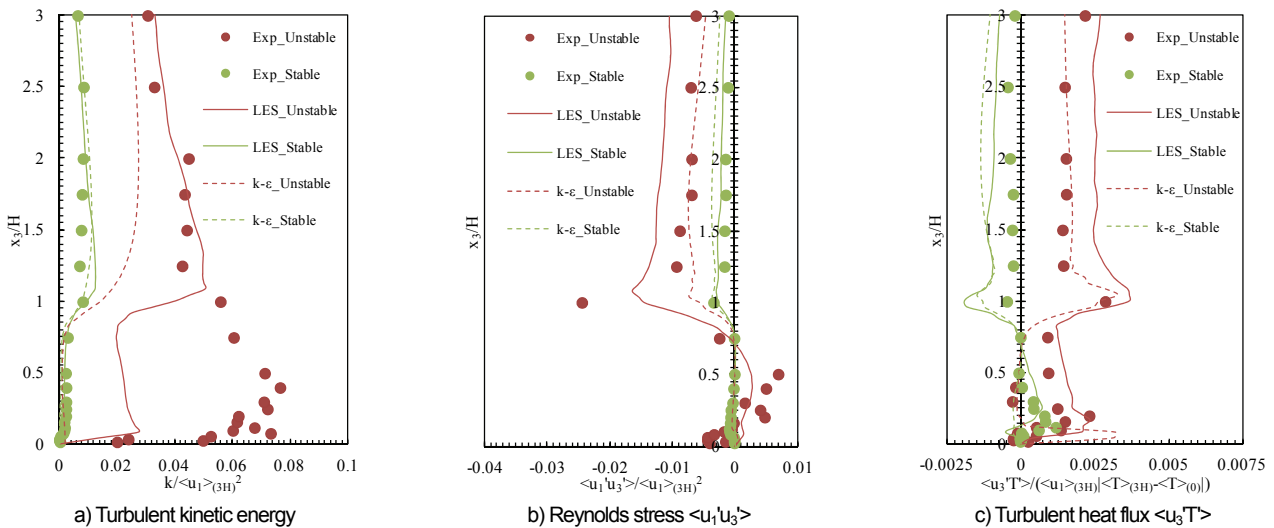


Fig. 12. Vertical profile of turbulent statistics at urban canyon center.

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の空間分布、平均温度の予測精度の低下につながったと考えられる。

4. まとめ

様々な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 LES は温度成層条件に関わらず都市キャニオン内外における平均風速、平均温度の予測精度が高い。

② k-ε は安定条件においては平均風速、平均温度ともに比較的予測精度が高いが、不安定条件においては都市キャニオン内の平均風速の空間分布、平均温度の予測精度が低下する。

③ 安定条件においては LES、k-ε ともに乱流エネルギーについて風洞実験と概ね一致するが、不安定条件においては LES、k-ε ともに都市キャニオン内の乱流エネルギーを過小評価する。

④ k-ε は LES、風洞実験と比較して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。つまり、k-ε では LES、風洞実験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の空間分布、平均温度の予測精度の低下につながったと考えられる。

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。

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  $\epsilon$ : 散逸率
- 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

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の空間分布を Fig. 13 に示す<sup>(10)</sup>。

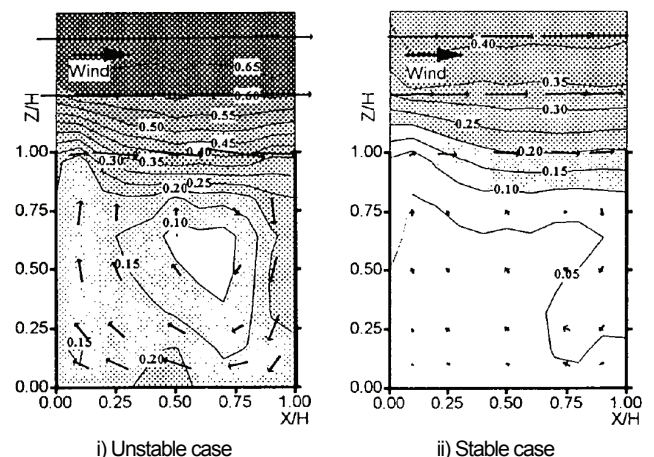


Fig. 13. Spatial distribution of mean wind velocity vector and  $\langle u_1'^2 + u_3'^2 \rangle^{1/2}$  within and above urban canyon at vertical center section<sup>(10)</sup>.

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, 松縄聖, 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, 2006.6
- (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, 76, pp.291-312, 2006.4
- (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, 99, pp.103-113, 2011.2-3
- (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, 99, pp.340-348, 2011.4
- (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 downtown Montreal, *Atmospheric Environment*, 45, pp.428-438, 2011.1
- (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, 1997.2
- (11) 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*, 96, pp.1749-1761, 2008.10-11