LES を用いた温度成層下の都市キャニオンにおける
標準 k-ε モデルの乱流フラックスモデリングの妥当性評価VALIDITY EVALUATION OF TURBULENT FLUX MODELING IN STANDARD k-ε MODEL
WITHIN AND ABOVE URBAN CANYON UNDER VARIOUS CONDITIONS OF
THERMAL STRATIFICATION USING LES

中島 慶悟*, 大岡 龍三**, 菊本 英紀***

Keigo NAKAJIMA, Ryozo OOKA and Hideki KIKUMOTO

In this study, the large-eddy simulation (LES) was conducted to investigate the validity of the Reynolds stress $\langle u_1' u_3' \rangle$ and turbulent heat flux $\langle u_3' T' \rangle$ modeling within and above the urban canyon under various conditions of thermal stratification. The standard k-ε model (k-ε model) failed to reproduce the spatial distribution of the mean wind velocity vector and temperature within the urban canyon as the thermal stratification became unstable. It underestimated the absolute value of the $\langle u_1' u_3' \rangle$ and $\langle u_3' T' \rangle$ compared with the LES. From the results of the LES, it was revealed that the production terms of the $\langle u_3' T' \rangle$ by the mean wind velocity gradient $P_{3T(2)}$ and buoyancy effect G_{3T} increased within the urban canyon. The G_{3T} was also increased above the urban canyon, although the $P_{3T(2)}$ was almost negligible. In the modeling of the $\langle u_3' T' \rangle$ of the k-ε model, these terms are neglected. It is necessary to incorporate the effects of the $P_{3T(2)}$ and G_{3T} in the modeling of the $\langle u_3' T' \rangle$ for the urban canyon flow under thermal stratification.

Keywords : LES, Standard k-ε model, Thermal stratification, Urban canyon, Reynolds stress, Turbulent heat flux

LES, 標準 k-ε モデル, 温度成層, 都市キャニオン, レイノルズストレス, 乱流熱フラックス

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。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が行われるようになってきた¹⁾。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²⁾。そこでは様々な形状の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、平均風速や乱流エネルギーに関する 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、数多くの研究により都市気流に関する 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きた^{例え ば 3)}が、その多く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、温度成層下の予測精度評価を行った事例は少ない。野口ら⁴⁾は不安定成層の平板境界層気流を対象として LES、RANS モデルを用いた CFD 解析を行い、風洞実験と比較した。その結果、RANS モデルの予測精度が低下することを示した。さらに LES の解析結果を用いて、不安定成層の平板境界層気流においては乱流熱フラックスの浮力生産項が大きくなり、RANS モデルで用いられる勾配拡散近似が妥当ではないことを示した。香月ら⁵⁾は不安定、安定の両方を含む温度成層下の平板境界層気流を対象として 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。平均風速、平均温度だけではなく、レイノルズストレス、乱流熱フラックス、さらには渦動粘性係数、渦熱拡散係数についても比較し、RANS モデルの問題点を指摘した。また、その結果に基づいて改良モデルを提案し、その精度検証も行っている。これらの研究では LES の解析結果や風洞実験結果を用いて運動量、熱の乱流輸送構造に関する詳細な検討を行っているが、流れ場は単純な平板境界層気流に限られている。

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 大学院生・修士(工学)
日本学術振興会特別研究員 DC

** 東京大学生産技術研究所 教授・博士(工学)

*** 東京大学生産技術研究所 講師・博士(工学)

Grad. Student, Dept. of Architecture, Faculty of Eng., The Univ. of Tokyo, M. Eng.
JSPS Research Fellow

Prof., I.I.S., The Univ. of Tokyo, Ph. D.

Lect., I.I.S., The Univ. of Tokyo, Ph. D.

Fig. 1 Analysis model (LES).

Fig. 2 Analysis model (k-ε model).

Fig. 3 Urban canyon.

一方、Yoshie ら⁶⁾は不安定成層の単体建物周辺気流を対象として 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。また、義江ら⁷⁾は不安定成層の都市街区気流を対象として 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。不安定成層においては 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、温度成層下の建物周辺気流や都市街区気流のような複雑な流れ場を対象としたこれらの研究では、CFD 解析と風洞実験の結果の比較にとどまっており、運動量、熱の乱流輸送構造の観点から RANS モデルの予測精度低下の要因を明らかにする検討は十分に行われていない。

本検討では不安定、安定の両方を含む温度成層下の都市街区気流を対象として LES、RANS モデルを用いた CFD 解析を行った。まず、LES、RANS モデルの解析結果を風洞実験と比較し、精度検証を行った。さらに、LES により得られた詳細な乱流統計量を用いて、風洞実験結果だけでは困難なレイノルズストレス、乱流熱フラックスのモデル化の妥当性に関する検討を行った。なお、本検討は今後、最も代表的な乱流モデルである標準 k-ε モデル(k-ε モデル)をベースとするモデル改良を行うための基礎的な知見を得ることを目的とする。温度成層下の都市キャニオン流れにおける k-ε モデルの問題点を整理するとともに、その高精度化にはどのような効果を組み込む必要があるのかを明らかにするため、RANS 解析の乱流モデルは k-ε モデルとした。

2. 解析手法

2. 1 解析対象

Fig. 1、Fig. 2 にそれぞれ LES、k-ε モデルの解析領域、Fig. 3 に解析対象である都市キャニオンを示す。本検討では、上原ら⁸⁾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。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。都市キャニオンにおける空間分布を考慮するため、Fig. 3 に示す UCW_3、UCW_2、UCW_1、UCC、UCL_1、UCL_2、UCL_3 の 7 つのサンプリング位置においてデータを取得した。なお、特に断らない限り LES で統計量を求める際には、 x_2 方向の同じ条件となる位置での統計量を平均して示す。

2. 2 解析条件

Table 1、Table 2 にそれぞれ LES、k-ε モデルの解析条件、Table 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、 $x_3=3H$ 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 $T=T_{(air)}$ の一様流とした。

k-ε モデルの乱流 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⁹⁾を用いた。k-ε モデルの 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²⁾にならい、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、温度成層条件は強不安定、弱不安定、弱安定、強安定の 4 つの Case について検討する。各 Case のバルクリチャードソン数(式(2))はそれぞれ強不安定では-0.3、弱不安定では-0.1、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、例えば、建物高さ 10m、気流温度 30℃、風速 5.0m/s とした場合、地表面温度が強不安定では約 38℃、弱不安定では約 33℃、弱安定では約 27℃、強安定では約 22℃の条件にそれぞれ相当する。

Table 1 Analysis conditions for LES.

SGS model	Standard Smagorinsky model ($C_s=0.12$, $Pr_{SGS}=0.7$) van Driest damping function
Analysis domain	$165H(x_1) \times 12H(x_2) \times 20H(x_3)$
Analysis grid	Analysis domain : $1340(x_1) \times 192(x_2) \times 128(x_3)$ Urban canyon : $16(x_1) \times 16(x_2) \times 16(x_3)$
Time marching	PISO
Time discretization scheme	2 nd order implicit scheme
Space discretization scheme	2 nd order central difference scheme
Inlet B.C.	$u_1=1.5\text{m/s}$ (Uniform flow), $T=T_{(air)}$
Outlet B.C.	Zero gradient
Side B.C.	Periodic
Top B.C.	Velocity : Free slip, $u_3=0$ Temperature : Adiabatic
Ground B.C. Building model block B.C.	Wall function (Spalding's law)

Table 2 Analysis conditions for k-ε model.

Analysis domain	$45H(x_1) \times 1.5H(x_2) \times 20H(x_3)$
Analysis grid	Analysis domain : $460(x_1) \times 24(x_2) \times 128(x_3)$ Urban canyon : $16(x_1) \times 16(x_2) \times 16(x_3)$
Time marching	SIMPLE
Discretization scheme of convection term	Velocity : 2 nd order upwind scheme $\langle T \rangle$, k , ε : TVD scheme
Inlet B.C.	$\langle u_1 \rangle$, $\langle T \rangle$, k : Value of the experiment ⁸⁾ ε : Value estimated from local equilibrium of turbulent kinetic energy ²⁾
Outlet B.C.	Zero gradient
Side B.C.	Periodic
Top B.C.	Velocity : Free slip, $u_3=0$ Temperature : Adiabatic
Ground B.C. Building model block B.C.	Velocity : Wall function (Generalized logarithmic law) Temperature : Wall function (Jayatilke P-function)

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

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

3. 解析結果

温度成層下の都市街区モデルを対象とした LES、k-ε モデルの流れ場、温度場に関する解析結果を上原ら⁸⁾の風洞実験結果と比較し、LES、k-ε モデルの予測精度について検討する。

3. 1 接近流

Fig. 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。風洞実験結果から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のが分かる。また、不安定になるほど x_1 方向風速変動 root mean square (rms) 値が大きくなっている。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強不安定、強安定においては良く一致したが、弱不安定、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 でプロファイル形状が良く一致したが、粗度ブロック群内においては安定になるほど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強不安定、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. 2 平均風速・平均温度

Fig. 5 に都市キャニオン中心における x_1 方向平均風速、平均温度の鉛直プロファイルをそれぞれ示す。 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)}。風洞実験結果から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のが分かる。

LES、k-ε モデルともに上空におけるこのような傾向は見られたが、k-ε モデルは風洞実験、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なった。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 モデルは LES と比較して風洞実験との対応が悪化した。強安定においては LES、k-ε モデル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化した。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 モデルでは浮力効果¹⁰⁾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化したと考えられる。さらに、強安定においてはバルクリチャ

Table 3 Conditions of thermal stratification.

	Case SU	Case WU	Case WS	Case SS
Thermal stratification	Strong unstable	Weak unstable	Weak stable	Strong stable
Ground temperature $T_{(0)}$	78.9°C	39.7°C	20.6°C	20.5°C
Air temperature $T_{(air)}$	19.8°C	19.0°C	38.4°C	77.6°C
Bulk Richardson number R_{bulk}	-0.3	-0.1	0.1	0.3

Fig. 4 Vertical profile of approaching flow for urban block model.

Fig. 5 Vertical profile of streamwise mean wind velocity and temperature at urban canyon center.

ードソン数が0.3であり、臨界リチャードソン数¹¹⁾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、LESの風洞実験との対応が悪化した可能性がある。

Fig. 6 から Fig. 9 に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。LES、k-εモデルともにいずれのCaseにおいても都市キャニオン内に循環渦が形成された。不安定になるほどLES、k-εモデルの循環渦の中心位置の相違が大

きくなった。上原らの風洞実験ではいずれのCase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る結果を示している⁸⁾。LESはこの傾向を再現できているが、k-εモデル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モデルでも風洞実験⁸⁾、LESと同様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モデルが同程度の値となったが、不安定になるほど

a) Case SU b) Case WU c) Case WS d) Case SS

Fig. 6 Spatial distribution of mean wind velocity vector within and above urban canyon (LES).

a) Case SU b) Case WU c) Case WS d) Case SS

Fig. 7 Spatial distribution of mean wind velocity vector within and above urban canyon (k-ε model).

a) Case SU b) Case WU c) Case WS d) Case SS

Fig. 8 Spatial distribution of mean temperature within and above urban canyon (LES).

a) Case SU b) Case WU c) Case WS d) Case SS

Fig. 9 Spatial distribution of mean temperature within and above urban canyon (k-ε model).

a) Streamwise wind velocity fluctuation rms b) Vertical wind velocity fluctuation rms

Fig. 10 Vertical profile of turbulent statistics at urban canyon center.

k-ε モデルは LES と比較して都市キャニオン内における平均温度を過小評価した。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 モデルより風洞実験結果⁹⁾に近い。k-ε モデルでは風洞実験、LES と比較して、都市キャニオン内の熱が十分に上空に放出されず、都市キャニオン内に滞留する傾向が見られた。

以上の結果から、k-ε モデルは 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、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. 3 乱れ性状

Fig. 10 に都市キャニオン中心における x_1 方向風速変動 rms 値、 x_3 方向風速変動 rms 値の鉛直プロファイルを示す^{注2)}。風洞実験結果から不安定になるほど風速変動 rms 値が大きくなることが分かる。

上空においては LES、k-ε モデルともにこのような傾向が見られたが、k-ε モデルは LES と比較して各 Case の相違が小さい。一方、強不安定、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 値がやや大きくなったが、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 モデルともに 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 モデルは都市キャニオン内における風速変動 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 モデルでは温度成層による浮力効果が風速変動 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。

4. $\langle u_1' u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3' T' \rangle$ のモデル化に関する検討

ここまでの検討結果から都市キャニオン内において LES と比較して k-ε モデルの平均風速ベクトル、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。ここでは、さらに LES の解析結果を用いて k-ε モデルの予測精度に最も大きい影響を与えられられる $\langle u_1' u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3' T' \rangle$ のモデル化の妥当性について検討する。

4. 1 $\langle u_1' u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3' T' \rangle$

Fig. 11 に都市キャニオン中心における $\langle u_1' u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3' T' \rangle$ の鉛直プロファイルを示す。風洞実験結果から不安定になるほど $\langle u_1' u_3' \rangle$ 、

a) Reynolds stress $\langle u_1' u_3' \rangle$ b) Turbulent heat flux $\langle u_3' T' \rangle$

Fig. 11 Vertical profile of turbulent flux at urban canyon center.

$\langle u_3' T' \rangle$ の絶対値が大きくなることが分かる。上空においては LES、k-ε モデルともにこのような傾向が見られたが、 $\langle u_1' u_3' \rangle$ については k-ε モデルは LES と比較して各 Case の相違が小さくなった。都市キャニオン内の $\langle u_1' u_3' \rangle$ の絶対値については LES、k-ε モデルともに不安定において過小評価した。k-ε モデルは各 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った。都市キャニオン内の $\langle u_3' T' \rangle$ の絶対値については、地表面付近を除き k-ε モデルは風洞実験、LES と比較して過小評価した。 $\langle u_3' T' \rangle$ の絶対値についても k-ε モデルは各 Case の相違がほとんど見られなかった。

以上の結果から k-ε モデルは風洞実験、LES と比較して不安定において都市キャニオン内の $\langle u_1' u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3' T' \rangle$ の絶対値を過小評価する傾向が示された。つまり、k-ε モデルでは不安定における都市キャニオン気流の運動量、熱の乱流輸送が十分に再現されず、平均風速、平均温度の空間分布の予測精度が低下したと考えられる。

4. 2 渦動粘性係数、渦熱拡散係数

LES の解析結果を用いて渦動粘性係数 ν_t 、渦熱拡散係数 α_t を推定し、k-ε モデルの結果と比較する。その結果に基づいて、 $\langle u_1' u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3' T' \rangle$ のモデル化の妥当性について検討する。本検討では大風¹²⁾にならない、式(3)を用いて LES の解析結果から ν_t を推定する。また、 α_t についても ν_t と同様の手法で推定することができる。 $\langle u_3' T' \rangle$ を勾配拡散近似すると式(5)となる。式(5)では同時に 3 つの式が成り立つため、 α_t を一意に決めることはできない。式(5)の右辺から $\langle u_3' T' \rangle$ を引き、 e_i^m とおく(式(6))。 e_i^m の二乗を Q^m とおく(式(7))と、 Q^m が最小となる時、真の $\langle u_3' T' \rangle$ と勾配拡散近似した $\langle u_3' T' \rangle$ の差が最小となる。したがって、 Q^m が最小となるような α_t を求めればよい。 Q^m は α_t の二次関数で下に凸であるため、その一次導関数(式(8))が 0 となる点で最小となる。したがって、 α_t は式(9)により求められる。さらに推定した ν_t 、 α_t を用いて、式(10)により乱流 Prandtl 数 Pr_t を推定することができる。

Fig. 12、Fig. 13 に ν_t 、 α_t の鉛直プロファイルをそれぞれ示す。上空の ν_t 、 α_t については LES と比較して k-ε モデルで各 Case の相違が小さくなった。不安定になるほど、LES と比較して k-ε モデルは都市キャニオン内の ν_t 、 α_t を過小評価した。また、LES の結果からいずれの Case においても都市キャニオン風上側、地表面付近の ν_t が

Fig. 12 Vertical profile of eddy viscosity coefficient v_t within and above urban canyon.

Fig. 13 Vertical profile of eddy diffusivity coefficient α_t within and above urban canyon.

負となっていることが分かる。負の v_t は運動量の逆勾配拡散現象が発生していることを意味する。逆勾配拡散現象は $k-\epsilon$ モデルで用いられる勾配拡散近似では再現できないため、これらの領域においては $\langle u_1' u_3' \rangle$ のモデル化の精度が著しく低下すると考えられる。

Fig. 14 に Pr_t の鉛直プロファイルを示す。上空においてはいずれの Case でも Pr_t が $k-\epsilon$ モデルで用いられる 0.9 よりやや小さい 0.7 程度の一定値となった。一方、都市キャニオン内においては、 Pr_t は一定値にはならず空間分布が存在した。都市キャニオン上端付近の風下側を除き、 $k-\epsilon$ モデルで用いられる値である 0.9 より小さくなった。都市キャニオン風上側、地表面付近の Pr_t が負となっているのは、運動量の逆勾配拡散現象が発生したためである。各 Case の都市キャニオン内における Pr_t の空間平均値はそれぞれ強不安定では 0.48、弱不安定では 0.46、弱安定では 0.43、強安定では 0.81 となっ

た。強安定以外の Case では都市キャニオン内における Pr_t が $k-\epsilon$ モデルの値の半分程度の値となった。したがって、都市キャニオン内においては $k-\epsilon$ モデルの Pr_t を一定値 0.9 とする仮定は妥当ではなく、 $\langle u_3' T' \rangle$ の精度低下の原因の一つであると考えられる。

$$v_t = -\frac{\langle u_i' u_j' \rangle S_{ij}}{S_{ki} S_{kl}} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$\langle u_i' T' \rangle = -\alpha_t \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$e_i^{\alpha_t} = -\alpha_t \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_i} - \langle u_i' T' \rangle \quad (6)$$

Fig. 14 Vertical profile of turbulent Prandtl number Pr_t within and above urban canyon.

Fig. 15 Vertical profile of production term of Reynolds stress $\langle u_1'u_3' \rangle$ and turbulent heat flux $\langle u_3'T' \rangle$ within and above urban canyon (Average of all sampling locations).

$$Q^{\alpha_t} = e_i^{\alpha_t} e_i^{\alpha_t} = \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_i} \alpha_t^2 + 2 \langle u_i'T' \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_i} \alpha_t + \langle u_i'T' \rangle^2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q^{\alpha_t}}{\partial \alpha_t} = 2 \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_i} \alpha_t + 2 \langle u_i'T' \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$\alpha_t = - \frac{\langle u_i'T' \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_i}}{\frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j}} \quad (9)$$

$$Pr_t = \frac{\nu_t}{\alpha_t} \quad (10)$$

4. 3 $\langle u_1'u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3'T' \rangle$ の生産項

LES の解析結果を用いて $\langle u_1'u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3'T' \rangle$ の生産項について検討する。 $\langle u_1'u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3'T' \rangle$ の生産項はそれぞれ $P_{13}+G_{13}$ 、 $P_{3T(1)}+P_{3T(2)}+G_{3T}$ により表される。 P_{13} は $\langle u_1'u_3' \rangle$ の生産項(式(11))、 G_{13} は $\langle u_1'u_3' \rangle$ の浮力生産項(式(12))を表す。また、 $P_{3T(1)}$ は平均温度勾配による $\langle u_3'T' \rangle$ の生産項(式(13))、 $P_{3T(2)}$ は平均風速勾配による $\langle u_3'T' \rangle$ の生産項(式(14))、 G_{3T} は $\langle u_3'T' \rangle$ の浮力生産項(式(15))を表す。

Fig. 15 に $\langle u_1'u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3'T' \rangle$ の各生産項の比の鉛直プロファイルを示す。なお、Fig. 15 に示すプロファイルは各サンプリング位置における結果を平均したものである。 $\langle u_1'u_3' \rangle$ については上空、都市キャニオン内の地表面付近において G_{13} の寄与が増加した。 $\langle u_3'T' \rangle$ については、上空においては $P_{3T(2)}$ の寄与は無視できるほど小さいが、都市キャニオン内においてはその影響が大きくなり、 $P_{3T(1)}$ と同程度かそれ以上の値となった。 G_{3T} は都市キャニオン上端付近以外においてその影響が大きくなり、 $P_{3T(1)}$ と同程度の値となった。特に、都市キャニオン内において G_{3T} が増加するが、これは上空より都市キャニオン内における温度変動が大きくなったためであると考えられる。また、 $P_{3T(2)}$ はいずれの Case においても都市キャニオン上端付近を除き、 $P_{3T(1)}$ と同じ符号となったが、 G_{3T} は不安定では $P_{3T(1)}$ と同じ符号、安定では $P_{3T(1)}$ と異なる符号となった。野口ら⁴⁾は不安定成層の平板境界層において同様の検討を行っており、 G_{3T} が $P_{3T(1)}$ と同程度の大きさとなる結果を示している。しかし、 $P_{3T(2)}$ はほぼ 0 となっており、都市キャニオン内における結果とは異なっている。これは都市キャニオン内においては循環渦が形成され、 x_3 方向平均風速の勾配が生

じたためであると考えられる。 $P_{3T(2)}+G_{3T}$ についても、都市キャニオン内においては $P_{3T(1)}$ と同程度の値となった。強安定では $P_{3T(2)}$ より G_{3T} の影響が大きく、 $(P_{3T(2)}+G_{3T})/P_{3T(1)}$ の符号が負となり、 $P_{3T(2)}+G_{3T}$ は $P_{3T(1)}$ とは逆に $\langle u_3'T' \rangle$ の生産を減少させた。一方、弱安定では都市キャニオン内においては G_{3T} より $P_{3T(2)}$ の影響が大きく、 $(P_{3T(2)}+G_{3T})/P_{3T(1)}$ の符号が正となり、 $P_{3T(2)}+G_{3T}$ は $\langle u_3'T' \rangle$ の生産を増加させた。また、不安定では $P_{3T(2)}$ 、 G_{3T} はともに $P_{3T(1)}$ と同じ符号となり、 $P_{3T(2)}+G_{3T}$ は $\langle u_3'T' \rangle$ の生産を増加させた。したがって、強安定以外の Case においては平均温度勾配による生産だけではなく、平均風速勾配による生産、浮力による生産により $\langle u_3'T' \rangle$ の絶対値が増加し、平均温度勾配から想定される以上の乱流熱輸送が発生した。その結果、 Pr_1 が k- ϵ モデルで用いられる値より小さくなったと考えられる。

k- ϵ モデルでは $\langle u_3'T' \rangle$ のモデル化に勾配拡散近似を用いており、モデル化の過程で $P_{3T(2)}$ 、 G_{3T} は無視する⁴⁾。しかし、LES の結果からいずれの Case においても $\langle u_3'T' \rangle$ の $P_{3T(2)}+G_{3T}$ が大きくなり、 $P_{3T(1)}$ と同程度の値となることが分かった。都市キャニオン内においては $P_{3T(2)}$ 、 G_{3T} を無視する $\langle u_3'T' \rangle$ の勾配拡散近似は妥当ではなく、 $\langle u_3'T' \rangle$ の精度が低下したと考えられる。上空においても強不安定、強安定では G_{3T} が $P_{3T(1)}$ の半分程度の値となるため、その影響を無視できない。また、乱流エネルギーの浮力生産項 G_k は $\langle u_3'T' \rangle$ に依存しており、 $\langle u_3'T' \rangle$ の精度低下は G_k の精度低下につながる。さらに、乱流エネルギーは v_i を介して $\langle u_i'u_3' \rangle$ に影響を与えるため、 $\langle u_3'T' \rangle$ の精度低下が $\langle u_i'u_3' \rangle$ の精度低下を招いたと考えられる。したがって、 $\langle u_3'T' \rangle$ のモデル化には、都市キャニオン内においては $P_{3T(2)}$ 、 G_{3T} の効果、上空においては G_{3T} の効果をそれぞれ組み込む必要がある。

$$P_{13} = -\langle u_1'u_k' \rangle \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_k} - \langle u_3'u_k' \rangle \frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_k} \quad (11)$$

$$G_{13} = -g_3 \beta \langle u_1'T' \rangle \quad (12)$$

$$P_{3T(1)} = -\langle u_3'u_k' \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_k} \quad (13)$$

$$P_{3T(2)} = -\langle u_k'T' \rangle \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_k} \quad (14)$$

$$G_{3T} = -g_3 \beta \langle T'^2 \rangle \quad (15)$$

5. 結論

温度成層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 モデルを用いた CFD 解析を行い、その結果を風洞実験結果と比較した。さらに、LES の解析結果を用いて $\langle u_1'u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3'T' \rangle$ のモデル化の妥当性について検討した。本検討により得られた知見を以下にまとめる。

- ① k- ϵ モデルは 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、平均温度の空間分布の予測精度が低下した。また、k- ϵ モデルは風洞実験、LES と比較して温度成層条件の違いによる平均風速プロファイルの変化が小さくなった。
- ② 強安定以外において k- ϵ モデルでは風洞実験、LES と比較して都市キャニオン内の風速変動 rms 値が小さくなった。k- ϵ モデ

ルでは上空、都市キャニオン内における風速変動 rms 値について各 Case の相違が風洞実験、LES より小さくなった。

- ③ k- ϵ モデルは風洞実験、LES と比較して不安定において都市キャニオン内の $\langle u_1'u_3' \rangle$ 、 $\langle u_3'T' \rangle$ の絶対値を過小評価した。つまり、k- ϵ モデルでは不安定における都市キャニオン気流の運動量、熱の乱流輸送が十分に再現されず、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と考えられる。
- ④ k- ϵ モデルは 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 v_i 、 α_i を過小評価した。また、温度成層条件に関わらず、都市キャニオン風上側、地表面付近において運動量の逆勾配拡散現象が発生した。
- ⑤ 都市キャニオン内においては Pr_1 の空間分布が存在し、強安定以外では k- ϵ モデルの値 0.9 の半分程度の値となった。都市キャニオン内においては k- ϵ モデルの Pr_1 を一定値 0.9 とする仮定は妥当ではなく、 $\langle u_3'T' \rangle$ の精度低下の原因の一つであると考えられる。
- ⑥ 都市キャニオン内においては平板境界層とは異なり、 $\langle u_3'T' \rangle$ の平均風速勾配による生産項 $P_{3T(2)}$ が平均温度勾配による生産項 $P_{3T(1)}$ と同程度かそれ以上の値となった。これは都市キャニオン内には循環渦が形成されるためであると考えられる。また、浮力生産項 G_{3T} も平均温度勾配による生産項 $P_{3T(1)}$ と同程度の値となった。上空においては強不安定、強安定では G_{3T} が $P_{3T(1)}$ の半分程度の値となった。
- ⑦ 都市キャニオン内において、強安定以外の Case では $(P_{3T(2)}+G_{3T})/P_{3T(1)}$ の符号が正となり、 $P_{3T(2)}+G_{3T}$ は $\langle u_3'T' \rangle$ の生産を増加させた。平均温度勾配による生産だけではなく、平均風速勾配による生産、浮力による生産により $\langle u_3'T' \rangle$ の絶対値が増加し、平均温度勾配から想定される以上の乱流熱輸送が発生した。その結果、 Pr_1 が k- ϵ モデルで用いられる値より小さくなったと考えられる。
- ⑧ 都市キャニオン内においては $P_{3T(2)}$ 、 G_{3T} を無視する $\langle u_3'T' \rangle$ の勾配拡散近似は妥当ではなく、 $\langle u_3'T' \rangle$ のモデル化の精度が低下したと考えられる。また、上空においても強不安定、強安定では G_{3T} が $P_{3T(1)}$ の半分程度の値となるため、その影響を無視できない。したがって、 $\langle u_3'T' \rangle$ のモデル化には、都市キャニオン内においては $P_{3T(2)}$ 、 G_{3T} の効果、上空においては G_{3T} の効果をそれぞれ組み込む必要がある。

謝辞

本研究は科学研究費補助金の基盤研究(S)(課題番号: 24226013、研究代表者: 大岡龍三)、特別研究員奨励費(課題番号: 15J07247、研究代表者: 中島慶悟)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。

注

注 1) 本検討の平均温度は $x_3=3H$ 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。

注 2) k- ϵ モデルでは式(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。

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

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

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)

k : 乱流エネルギー ε : 散逸率

T : 温度 g_i : 重力加速度 β : 体膨張係数

f : 変数 f の瞬時値 $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均値 f' : 変数 f の時間変動値

参考文献

- 1) Murakami, S., Ooka, R., Mochida, A., Yoshida, S., Kim, S.: CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.81, pp.57-81, 1999.5
- 2) Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T.: 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, 2008.10-11
- 3) Nakajima, K., Ooka, R., Kikumoto, H.: Study of gradient diffusion approximation of Reynolds stress within and above an urban canyon using LES database, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.80, No.717, pp.1083-1093, 2015.11 (in Japanese)
中島慶悟, 大岡龍三, 菊本英紀: LES データベースを用いた都市キャニオン内外におけるレイノルズストレスの勾配拡散近似に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 第80巻, 第717号, pp.1083-1093, 2015.11
- 4) Noguchi, Y., Murakami, S., Mochida, A., Tominaga, Y.: Numerical study of thermal environment in urban area (part 3) Incorporation of buoyancy effect into modeling for $\langle u_3'\theta' \rangle$ in k - ε model, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering, D, pp.65-66, 1994.9 (in Japanese)
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, D, pp.65-66, 1994.9

- 5) Katsuki, T., Ooka, R., Takahashi, T., Kato, S.: Wind tunnel experiment and numerical simulation of atmospheric boundary layer under various atmospheric stability, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.74, No.640, pp.735-743, 2009.6 (in Japanese)
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, 第74巻, 第640号, pp.735-743, 2009.6
- 6) Yoshie, R., Jiang, G., Shirasawa, T., Chung, J.: CFD simulations of gas dispersion around high-rise building in non-isothermal boundary layer, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.99, pp.279-288, 2011.4
- 7) Yoshie, R., Nomura, K., Katada, K., Jiang, G.: Non-isothermal large-eddy simulation of pollutant and thermal dispersion in urban street canyons, Proceedings of the 22nd National Symposium on Wind Engineering, pp.61-66, 2012 (in Japanese)
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
- 8) Uehara, K., Wakamatsu, S., Murakami, S.: Wind tunnel test on stratified flow fields within turbulent boundary layer by LDV, National Institute of Environmental Studies, 1997 (in Japanese)
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
- 9) Viollet, P.L.: The modelling of turbulent recirculating flows for the purpose of reactor thermal-hydraulic analysis, Nuclear Engineering and Design, Vol.99, pp.365-377, 1987.2
- 10) Eidson, T.M.: Numerical simulation of the turbulent Rayleigh-Benard problem using subgrid modelling, Journal of Fluid Mechanics, Vol.158, pp.245-268, 1985
- 11) Lyons, R., Panofsky, H.A., Wollaston, S.: The critical Richardson number and its implications for forecast problems, Journal of Applied Meteorology, Vol.3, pp.136-142, 1964.4
- 12) Okaze, T., Mochida, A., Ono, A., Kannuki, Yo.: LES analysis of the effects of urban roughness on flow structure within urban canopy layer (Part I) Estimation of turbulent length scale using LES data, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering, II, pp.777-778, 2013.8 (in Japanese)
大風翼, 持田灯, 小野梓, 環貫陽: LES による都市ラフネスが都市 Canopy 層の流れの構造に及ぼす影響の分析 (その1) 乱れの長さスケールの推定方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.777-778, 2013.8

VALIDITY EVALUATION OF TURBULENT FLUX MODELING IN STANDARD $k-\epsilon$ MODEL WITHIN AND ABOVE URBAN CANYON UNDER VARIOUS CONDITIONS OF THERMAL STRATIFICATION USING LES

Keigo NAKAJIMA *, *Ryozo OOKA* ** and *Hideki KIKUMOTO* ***

* Grad. Student, Dept. of Architecture, Faculty of Eng., The Univ. of Tokyo, M. Eng.
JSPS Research Fellow

** Prof., I.I.S., The Univ. of Tokyo, Ph. D.

*** Lect., I.I.S., The Univ. of Tokyo, Ph. D.

Urban environmental problems such as urban heat island and air pollution have become serious in a weak wind region like an urban canopy. Improvements of the computer performance have made it easier to assess urban environmental problems using computational fluid dynamics (CFD) analysis. In a weak wind region, the buoyancy effect has more influence on the flow than in a strong wind region. It is necessary to consider the buoyancy effect due to the thermal stratification when we conduct the CFD analysis for the urban environmental problems in a weak wind region.

In a few studies, the prediction accuracy of the CFD analysis using the large-eddy simulation (LES) and Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) model was evaluated by comparing with the wind tunnel experiment for urban canyon flow under unstable thermal stratification. However, in these studies, the turbulent momentum and heat transfer mechanism and validity of the Reynolds stress and turbulent heat flux modeling were not investigated. It is not clear how the thermal stratification affect the turbulent momentum and heat transfer mechanism and the Reynolds stress and turbulent heat flux modeling for urban canyon flow. In this study, we conducted the CFD analysis using the LES and RANS model for flow in urban block model under the unstable and stable thermal stratification. The results of the LES and RANS model were compared with that of the wind tunnel experiment to evaluate the prediction accuracy of them. Moreover, using the results of the LES, we investigated the Reynolds stress $\langle u_1' u_3' \rangle$ and turbulent heat flux $\langle u_3' T' \rangle$ modeling in the RANS model. In this study, the standard $k-\epsilon$ model ($k-\epsilon$ model) was used as the turbulence model of the RANS model.

The $k-\epsilon$ model failed to reproduce the spatial distribution of the mean wind velocity vector and temperature within the urban canyon compared with the LES except for in the strong stable case. The difference of vertical profile of the mean wind velocity among each thermal stratification was smaller in $k-\epsilon$ model compared with the LES. The $k-\epsilon$ model underestimated the absolute value of the Reynolds stress $\langle u_1' u_3' \rangle$ and turbulent heat flux $\langle u_3' T' \rangle$. It is thought that the prediction accuracy of the $k-\epsilon$ model decreased because it underestimated the exchange of the momentum and heat within and above the urban canyon compared with the LES.

The eddy viscosity coefficient ν_t , eddy diffusivity coefficient α_t and turbulent Prandtl number Pr_t were estimated from the results of the LES and compared with that of the $k-\epsilon$ model. Within the urban canyon, the ν_t and α_t of the $k-\epsilon$ model were much smaller than that of the LES except for in the strong stable case. The Pr_t varied spatially and was much smaller than 0.9, the value used in the $k-\epsilon$ model, within the urban canyon. This is one of the reasons why the accuracy of the $\langle u_3' T' \rangle$ decreased in the $k-\epsilon$ model. The production terms of the $\langle u_1' u_3' \rangle$ and $\langle u_3' T' \rangle$ were calculated using the results of the LES. It was revealed that the production terms of the $\langle u_3' T' \rangle$ by the mean wind velocity gradient $P_{3T(2)}$ and buoyancy effect G_{3T} increased compared with the production term by the mean temperature gradient $P_{3T(1)}$ within the urban canyon. The G_{3T} was also increased above the urban canyon, whereas the $P_{3T(2)}$ was almost negligible. In the modeling of the $\langle u_3' T' \rangle$, the $P_{3T(2)}$ and G_{3T} are neglected. It is necessary to incorporate the effects of $P_{3T(2)}$ and G_{3T} in the modeling of the $\langle u_3' T' \rangle$ of the $k-\epsilon$ model for urban canyon flow under thermal stratification.

(2017 年 2 月 10 日原稿受理, 2017 年 7 月 7 日採用決定)