

平成 30 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 30 年度
課題番号：183008
研究課題名（和文）：大気安定度を考慮した人工的に生成した流入変動風を用いた
LES による単体角柱周辺の数値・温度・濃度場予測
研究課題名（英文）：Large-Eddy Simulation of Flow, Temperature and Dispersion Fields
around an isolated Building Using Artificially Generated Inflow
Turbulent Fluctuations of Wind Velocity and Air Temperature
研究代表者：大風 翼
交付決定額（当該年度）： 250,000 円

1. 研究の目的

最近の計算機性能のめざましい進歩により、都市スケールの風環境、これに付随する温度場・濃度場の予測に LES(Large-eddy simulation)が用いられるようになり、流入変動風を生成する研究も精力的に行われている。LES の流入変動風を生成する手法としては、①予備計算を行い、直接変動風を得る手法、②仮定した乱流統計量を満たすよう乱数を組み合わせて変動風を人工的に得る手法、の 2 つに大別される。

研究代表者の大風は、上記②の手法の一つを援用して、乱流フラックスのコレスキー分解に基づき、風速変動に加えてスカラー変動を加えた流入変動風を生成する手法を開発した^{文献1}。続いて、温度成層風洞での境界層を対象とした実験結果との比較から、その有用性を示した。さらに、大気安定度を考慮した流入変動風を人工的に生成し、不安定成層及び安定成層中に置かれた 1:1:2 単体建物周辺流れ場を対象に、非等温 LES を実施し、風洞実験との比較から、妥当性の検証を行った^{文献2}。

本研究では、不安定成層中に置かれた建物後方からガスを排出した風洞実験を対象に LES を実施し、大気安定度を考慮した流入変動風の建物周辺気流の速度場、温度場、濃度場への適用性について検討する。

2. 研究の方法

東京工芸大学グローバル COE プログラム「風工学・教育研究のニューフロンティア」で整備されデータベースとして公開されている弱不安定成層中に置かれた 1:1:2 単体建物周辺の流れ場^{文献3}を対象とした。建物後方の床面からエチレンガスが放出され、速度場、温度場、濃度場が計測されている。流入面における建物高さ $H (= 0.16 \text{ m})$ の平均風速 $\langle u_H \rangle (= 1.46 \text{ m/s})$ 、流入面における床面と建物高さの平均温度差 $\Delta\theta (= 33.6 \text{ }^\circ\text{C})$ 、境界層内の平均温度 $\langle \theta \rangle$ 重力加速度 $g (= 9.81 \text{ m/s}^2)$ を用いて算出した Richardson 数は、 $Ri = -0.10$ である。ガスは、5 ϕ の管より床面から排出され、濃度は $5.0 \times 10^{-4} \text{ ppm}$ 、排出流量は $9.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 、平均温度は $30.4 \text{ }^\circ\text{C}$ であった。

LES は、OpenFOAM ver.2.4.0 を用いて行い、Sub-grid scale の乱流モデルは標準スマゴリンスキーモデルを用いた。スマゴリンスキー定数は、 $C_s = 0.12$ とした。その他、計算条件はまとめて、Table 1 に示す。流入面(7.5H×6.25H)において、参考文献 1 の手法を用いて、1/16H 間隔で、温度変動を含む変動風を生成し、これを流入条件として課した。変動風の生成に必要な乱れの特徴的

長さスケールは、縦相関に対応するスケールとして $1.0H$ と仮定し、これを横相関に対応する長さスケールに変換した。本研究では、鉛直方向に一定の値を用いた。乱れの特徴的時間スケールは、テイラーの凍結乱流の仮説より、乱流変動の縦相関に対応する乱れの特徴的長さスケールと平均風速を用いて換算した。

まず、人工的に生成した流入変動風を流入条件とし、粗面上を吹走させ、乱流統計量の減衰・回復の程度を把握するとともに、乱流構造の再構成を促す。続いて、乱流構造を再構成した変動風を用い、単体建物周辺の流れ場、温度場、濃度場の再現解析を実施し、各種乱流統計量に関して、実験結果と比較する。

LES は、20s の予備解析の後、40s 間解析を実施し、統計量を取得した。諸量は、建物高さ、流入面の建物高さにおける平均風速、流入面における床面温度と建物高さの平均温度差、排出ガスの排出口での濃度を用いて、無次元化している。

Table 1 計算条件

解析領域	$12.5H(x) \times 7.25H(y) \times 6.5 H(z)$
メッシュ分割	$147(x) \times 114(y) \times 90(z)$
SGS モデル	標準 Smagorinsky モデル ($C_s = 0.12$)
時間差分スキーム	完全院解法 (クーラン数が 1 以下になるよう時間刻みを設定した。)
空間差分スキーム	二次精度中心差分 (ただし、速度に関しては数値振動を抑制するため、一次風上差分を 5% 混入)
流入境界	文献 1 の乱流フラックスのコレスキー分解に基づく手法
流出境界	対流境界条件
上面・側面境界	Slip 壁
地表面境界	速度場、温度場ともに 2 層モデル
Reynolds 数	$1.5 \times 10^4 ((u_H) \times H/\nu)$
Richardson 数	-0.10

3. 研究成果

図 1 に建物中心断面付近を通る領域の速度の第 2 不変量を示す。人工生成された流入変動風が、L 字アングル上を吹走し、建物前方領域に至るまでに乱流構造が再現されている様子がわかる。図 2 に $z=0.25H$ におけるスカラー風速の分布を示す。やや大きめの構造が流面付近に見られるが、L 字アングル 4 本程度通過することで、主流方向に伸びる構造が見られ始めている。これは、図 1 において、乱流構造が再構成され始めている領域とも対応している。図 3 に、図 1 におけるフェッチ部の 4 つの測線上の諸量の鉛直分布を示す。図 3 中の ○ は、4 つの測線のうち最も風下側 (右側) での実験結果である。平均風速、平均温度ともに、よく実験結果を再現できていた。図は省略するが、2 次の統計量についても概ね実験結果の傾向を再現できていた。

図 4 に建物周辺での主流方向の平均風速、ノルマルストレスの実験と LES の結果の比較を示す。平均風速は、実験を非常によく再現できている。ノルマルストレスに関しても、やや過大評価する領域があるものの、概ね実験結果を再現できた。LES により、適切に流れ場が予測できたと考え、続いて、濃度場の比較を行う。

図 5 に $z=0.25H$ における平均濃度の水平分布を示す。建物後方の Wake 内で濃度が大きくなる様子が定量的に再現できた。建物後方の周期的変動を受ける建物側方においても、建物から離れるにつれて検証する傾向を定量的によく再現できた。

<参考文献>

- 1) T.Okaze and A.Mochida: Computers & Fluids, 159, pp. 23-32, 2017.
- 2) Tsubasa Okaze, Akashi Mochida: J. Heat Island Inst. Int., Vol. 12, No. 2, pp. 29-34, 2017.
- 3) 東京工芸大学 グローバル COE プログラム 風工学技術情報室 : http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/pollution/pollution.html

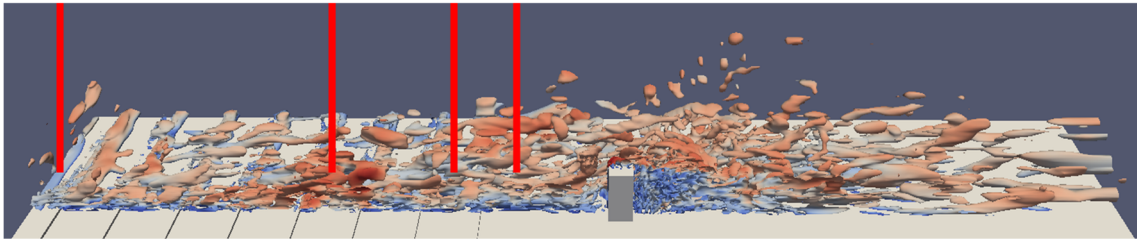


図 1 建物中心断面付近を通る領域の速度の第 2 不変量

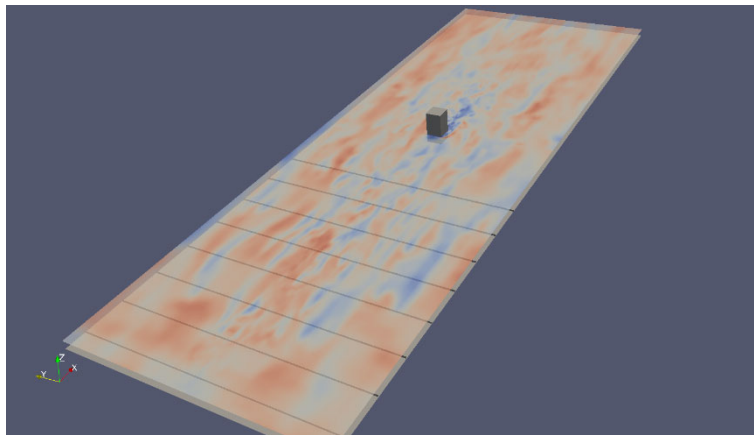
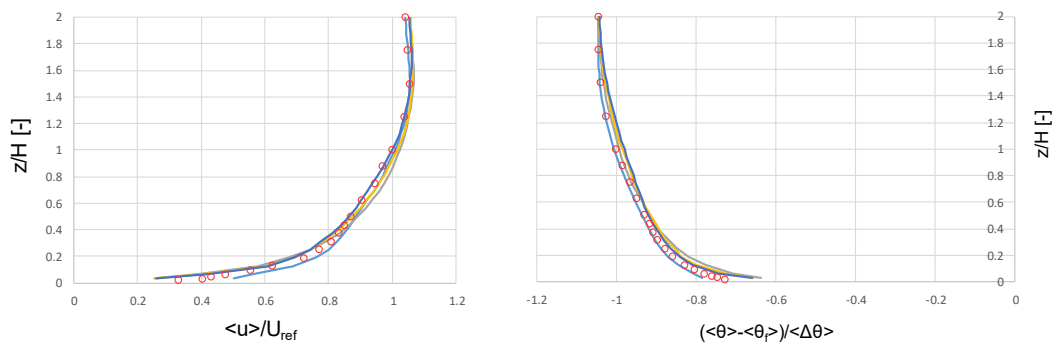


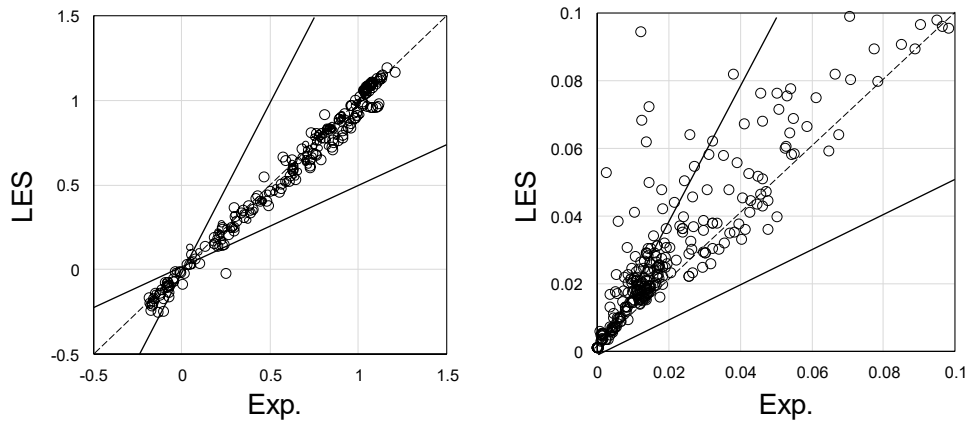
図 2 $z=0.25H$ におけるスカラー風速



(1) 平均風速

(2) 平均温度

図 3 フェッチ部における諸量の主流方向の変化(線が図 1 の 4 つの赤い直線上での LES の結果、○が流入面における実験結果)



(1) 平均風速の主流成分 (2)ノルマルストレスの主流成分

図4 建物周辺の速度場の比較

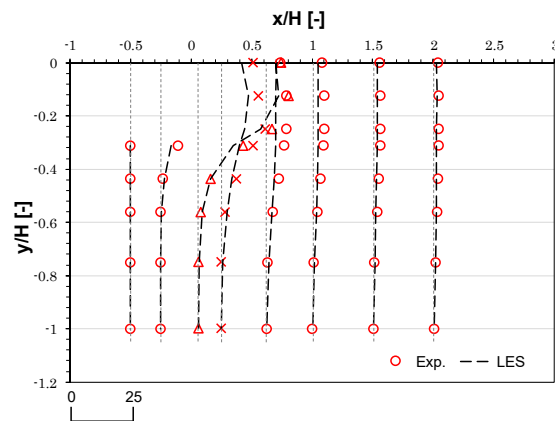


図5 $z=0.25H$ における平均濃度の分布

4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計2件)

1. Okaze T., Li X., Mochida, A.: Numerical simulation of non-isothermal flow and dispersion fields: An LES study with artificially generated inflow turbulence, Proceedings of the the International Workshop on Wind Effects on Buildings and Urban Environment, 2019

2. Li X., Okaze T.: Unsteady RANS simulation and large-eddy simulation around an isolated building: The effects of separation shear layer on the instantaneous concentration dispersion field, Proceedings of the International Workshop on Wind Effects on Buildings and Urban Environment, 2019

[図書] (計0件)

[その他, 産業財産権, ホームページ等]

5. 研究組織

(1)研究代表者

大風 翼 (東京工業大学)

(2)研究分担者

1. 玄 英麗 (東京工芸大学)

2. 李 心怡 (東京工業大学)

6. 要約(Abstract)

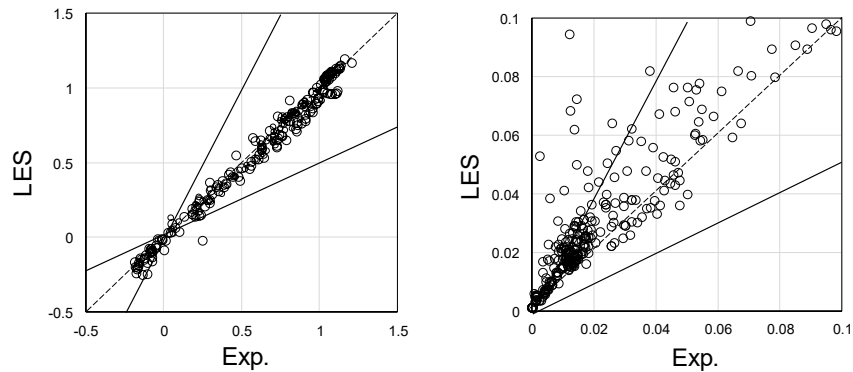
研究課題名：大気安定度を考慮した人工的に生成した流入変動風を用いた LES による単体角柱周辺の速度・温度・濃度場予測

研究代表者名（所属）：大風 翼（東京工業大学）

内容・図：

本研究では、大気安定度を考慮した流入変動風を人工的に生成し、温度成層を考慮した拡散場の風洞実験データベースを対象とした LES を実施することにより、流入変動風の建物周辺気流の濃度場への適用性について検討を行った。解析対象は、東京工芸大学グローバル COE プログラム「風工学・教育研究のニューフロンティア」で整備されている弱不安定成層中に置かれた単体建物周辺の流れ場とした。不安定成層中に 1:1:2 の単体建物が置かれ、建物後方の床面からエチレングスが放出され、速度場、温度場、濃度場が計測されている。LES は、OpenFOAM ver.2.4.0 を用いて行い、Sub-grid scale の乱流モデルは標準スマゴリンスキーモデルを用いた。スマゴリンスキー定数は、 $Cs=0.12$ とした。流入変動風は、レイノルズ応力、乱流温度フラックスのコレスキー分解に基づく手法により生成した。解析対象の建物の風上側にフェッチ部を設置し、人工的に生成した流入変動風に含まれる非物理的な変動を解消させ、乱流構造の再構成を促した。

図 1 に建物周辺での主流方向の平均風速、ノルマルストレスの実験と LES の結果の比較を示す。平均風速は、実験を非常によく再現できている。ノルマルストレスに関しても、やや過大評価する領域があるものの、概ね実験結果を再現できた。LES により、適切に流れ場が予測できたと考え、続いて、濃度場の比較を行う。図 2 に $z=0.25H$ における平均濃度の水平分布を示す。建物後方の Wake 内で濃度が大きくなる様子が定量的に再現できた。建物後方の周期的変動を受ける建物側方においても、建物から離れるにつれて検証する傾向を定量的によく再現できた。



(1) 平均風速の主流成分 (2)ノルマルストレスの主流成分

図 1 建物周辺の速度場の比較

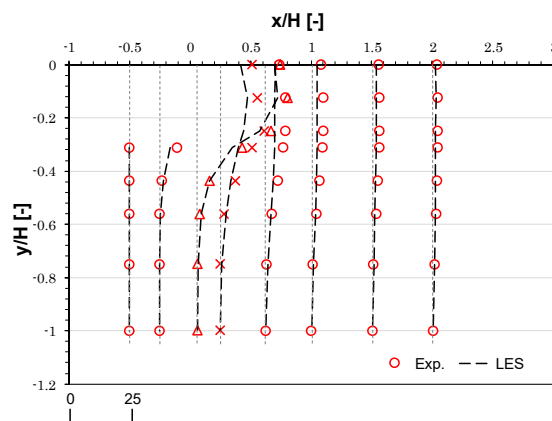


図 2 $z=0.25H$ における平均濃度の分布