

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：173007

研究課題名(和文)：人工的に生成した温度変動を含む流入変動風を用いた建物周辺の Large-Eddy Simulation

研究課題名(英文)：Large-Eddy Simulation of Non-Isothermal Flow around a Building using Artificially Generated Inflow Turbulence including Temperature Fluctuation

研究代表者：大風 翼

交付決定額(当該年度)：300,000 円

※ページ数の制限はありません。

※成果等の説明に図表を使用していただいて構いません。(カラーも可)

※提出して頂いた成果報告書をホームページでの公開を予定しております。

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。研究代表者は近年、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、風速変動に加えて温度変動等のスカラー変動を加えた流入変動風を生成する新しい手法を開発し、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。

本研究では、温度成層風洞で実施された単体角柱周辺の風洞実験を対象に、上記 1) で生成した流入変動風を用いて LES 解析を実施し、風洞実験との比較から、人工的に生成された温度変動を含む流入変動風の妥当性・有用性を示す。

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温度成層中に置かれた単体建物周辺の流れ場を対象とする。

まず、流入部分で計測された、レイノルズ応力、乱流温度フラックス等の統計量を目標値として、温度変動を含む LES の流入変動風を作成する。

次に、人工的に生成した変動風を用い、単体建物周辺の流れ場、温度場の再現解析を実施する。平均値に加え、レイノルズ応力、乱流熱フラックス、温度変動の分散などの二次の統計量についても、実験結果と比較する。さらに、パワースペクトルについても分析を行い、人工的に生成した変動風を用いることで再現される速度変動、温度変動の周波数特性についても、分析を加える。

3. 研究成果

3.1. 解析概要

解析対象は、東京工芸大学の温度成層風洞で実施されデータベースとして整備されている 1:1:2 の単体建物周辺の非等温流れ場とした。成層状態は弱不安定で、流入面における建物高さ H ($= 0.16$ m) の平均風速 $\langle u_H \rangle$ ($= 1.46$ m/s)、流入面における床面と建物高さの平均温度差 $\Delta\theta$ ($= 33.6$ °C)、境界層内の平均温度 $\langle \theta \rangle$ 、重力加速度 g ($= 9.81$ m/s²) を用いて算出した Richardson 数は、 $Ri = -0.10$ である。流入面 ($7.5H \times 6.25H$) において、雑誌論文 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流の特徴的長さスケールは、境界層高さ(およそ $1.5H$) の 0.15 倍と仮定し、一定値を用いた。特徴的時間スケールは、Taylor の凍結乱流の仮定より、特徴的長さスケールと境界層上端の風速を用いて換算した。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。その他、計算条件はまとめて、Table 1 に示す。建物高さ H と流入面における建物高さの平均風速 $\langle u_H \rangle$ で無次元化した時間でおおよそ 200 だけ助走計算を行い、その後、おおよそ 200 間の乱流統計量を取得した。

Table 1 計算条件

解析領域	$12.5H(x) \times 7.25H(y) \times 6.5H(z)$
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、局所的に一次風上差分を混入)
流入境界	雑誌論文 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： Werner and Wengle の Linear - power law 型の 2 層モデル 温度場： 土屋らの Linear - power law 型の 2 層モデル
Reynolds 数	$1.5 \times 10^4 (\langle u_H \rangle \times H/\nu)$
Richardson 数	-0.10

3.2. 解析結果

速度、乱流エネルギー(TKE)は流入面における建物高さの風速 $\langle u_H \rangle$ 、温度は床面の平均温度 $\langle \theta_f \rangle$ との温度差 $(\theta - \langle \theta_f \rangle)$ を流入面における建物高さ H と床面の平均温度差 $(\langle \theta_H \rangle - \langle \theta_f \rangle)$ で除すことで無次元化した。

Fig. 1 に、流入面、主流方向建物中心断面及び $z = 0.25H$ における x - y 平面の無次元温度の瞬時値の分布を示す。流入面で温度変動が生成されている様子がわかる。建物中心断面や $z = 0.25H$ の x - y 平面の建物風上側の領域でも、温度変動が見られ、流入面で生成された温度変動が移流していると考えられる。建物側方の強風域の風下側では、剥離に伴い、床面近傍の流れが加速し、高温の空気が上方へ輸送されるため、 $z = 0.25H$ の x - y 平面上において局所的に周辺より温度の高い領域が見られる。

Fig.2 に、主流方向の平均風速、TKE 及び平均温度の実験値と LES による解析値の比較を散布図で示す。実験の測定点は、建物周辺の主流方向建物中心断面上に 152 点及び $z = 0.25H$ の x - y 平面上に 101 点設置されている。平均風速は非常によく一致しており、平均温度についても、LES のほうが温度の高い測定点が幾つかあるが、全体的にはよく一致している。TKE は、値が小さい領域は実験値のほうが大きく、値が大きい領域では LES のほうが大きい傾向があった。TKE が小さい領域は主に建物前方に対応しており、大きい領域は建物後方に対応している。人工的に生成した流入変動風は、連続式を満たさないため、流入直後に TKE が減衰することが指摘されており、本解析でも、建物風上側の TKE が僅かに減少し、この影響で建物後方の周期的変動が実験よりも顕著に現れ、その結果、建物後方では、LES の TKE のほうが、実験よりも大きくなったと考えられる。

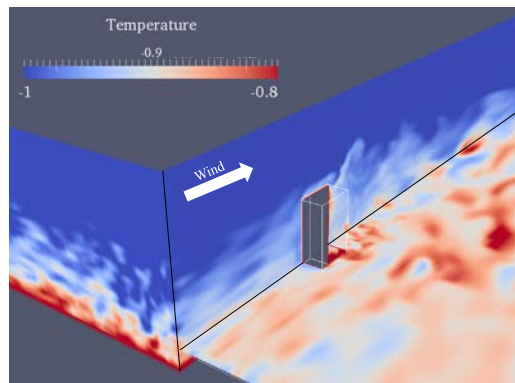


Fig. 1 温度場のスナップショット
($x = 0H$ (inflow boundary), $y = 0H$ (center section) and $z = 0.25H$)

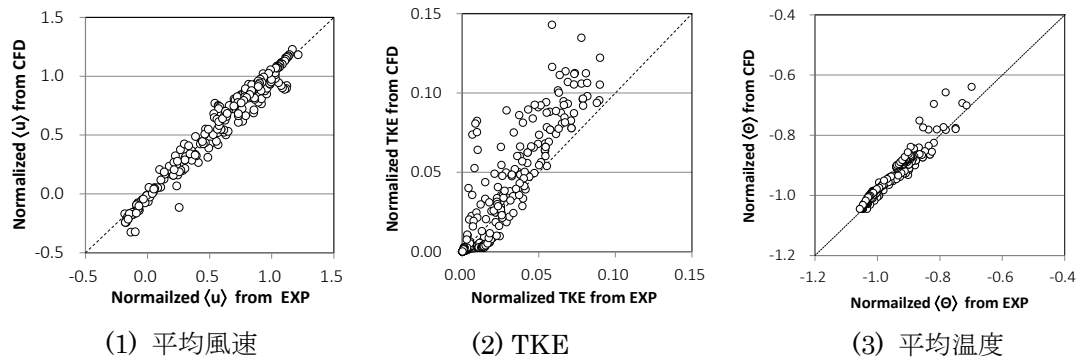


Fig.2 風洞実験と LES の比較

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 2 件)

1. T.Okaze and A.Mochida: Cholesky decomposition-based generation of artificial inflow turbulence including scalar fluctuation, Computers & Fluids, 159, pp. 23-32, 2017.
2. Tsubasa Okaze, Akashi Mochida: Large-Eddy Simulation of Non-Isothermal Flow around a Building Using Artificially Generated Inflow Turbulent Fluctuations of Wind Velocity and Air Temperature, Journal of Heat Island Institute International, Vol. 12, No. 2, pp. 29-34, 2017

[学会発表] (計 0 件)

[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. 張 偉榮 (東京工芸大学)
2. 玄 英麗 (東京工芸大学)
3. 持田 灯 (東北大学)
4. 石田 泰之 (東北大学)
5. 河西 昌隆 (東北大学)
6. 新井 千秋 (東北大学)
7. 瀧澤 幸大 (東北大学)
8. 本間 実季 (東北大学)
9. 山本 ミゲイル (東北大学)

6. 要約 (Abstract)

研究課題名：人工的に生成した温度変動を含む流入変動風を用いた建物周辺の
Large-Eddy Simulation

研究代表者名 (所属)：大風 翼 (東京工業大学)

要約 (700 文字以内) ・ 図

本研究では、レイノルズ応力及び乱流熱フラックスのコレスキー分解に基づき、温度変動を含む流入変動風を生成し、単体建物周辺の不安定流れに適用した。解析対象は、東京工芸大学の温度成層風洞で実施されデータベースして整備されている 1:1:2 の単体建物周辺の非等温流れ場とした。成層状態は弱不安定である。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。

図 1 に、流入面、主流方向建物中心断面及び $z = 0.25H$ における $x-y$ 平面の無次元温度の瞬時値の分布を示す。流入面で温度変動が生成されている様子がわかる。建物中心断面や $z = 0.25H$ の $x-y$ 平面の建物風上側の領域でも、温度変動が見られ、流入面で生成された温度変動が移流していると考えられる。建物側方の強風域の風下側では、剥離に伴い、床面近傍の流れが加速し、高温の空気が上方へ輸送されるため、 $z = 0.25H$ の $x-y$ 平面上において局所的に周辺より温度の高い領域が見られる。

図 2 に風洞実験と LES の比較を示す。図は省略するが、平均風速は実験とよく一致しており、平均温度についても、LES のほうが温度の高い測定点が幾つかあるが、全体的にはよく一致していた。TKE は、値が小さい領域は実験値のほうが大きく、値が大きい領域では LES のほうが大きい傾向があった。TKE が小さい領域は主に建物前方に対応しており、大きい領域は建物後方に対応している。人工的に生成した流入変動風は、入直後に TKE が減衰することが指摘されており、本解析でも、建物風上側の TKE が僅かに減少し、この影響で建物後方の周期的変動が実験よりも顕著に現れ、その結果、建物後方では、LES の TKE の方が、実験よりも大きくなったと考えられる。

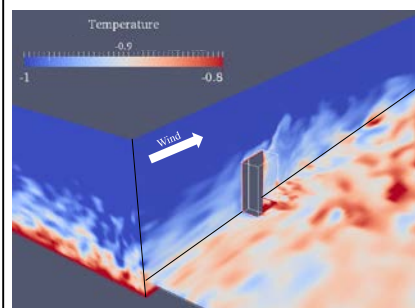
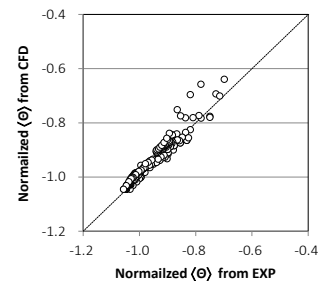
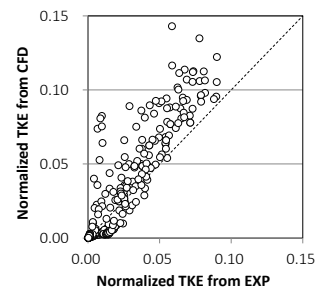


図 1 温度場のスナップショット



(1) 平均温度



(2) TKE

図 2 風洞実験と LES の比較