

都市乱流境界層を再現する変動風の統計的性質に関する研究

真鍋, 順也

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7178749>

出版情報：九州大学, 2023, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



都市乱流境界層を再現する変動風の統計的性質に関する研究

都市環境科学研究室 真鍋 順也

1. 緒言

地球上で急速な人口増加する中で、都市部への人口集中に起因した環境問題が浮かび上がっている。例えば、ヒートアイランド現象や汚染物質滞留、ビル風・突風問題である。これらの環境問題は都市構造に起因しており、屋外計測や風洞模型実験 (Wind Tunnel Experiment, WTE)、数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics, CFD) により研究解析が行われている。

これらの研究により都市構造による環境への影響を調査する際、実街区を対象とした研究がある。実街区を対象にした研究は、実在する都市部を再現する。また、都市部の風上側に周辺環境から受ける影響を再現するために、ラフネスやブロック群を置いて、大気境界層を再現し、変動流入風を都市部に流入させる。しかし、非常に精度の高い結果が得られる事がメリットとして挙げられる一方で、実験にかかるコストが高い、準備にかかる時間が長いというデメリットが存在する。このようなデメリットを解消するため、CFD を用いた研究の重要性が上がってきている。一方、CFD では、都市部及び周辺環境を再現する手法と変動流入風を再現し、都市部に流し込むという2種の方法があるが、前者は、計算コストが高く、後者は物理的妥当性が明らかとなっていない。

以上のことから、風洞模型実験により再現された変動流入風と CFD により再現された変動流入風を比較し、評価することを本研究の最終目的とする。

2. 解析対象

本研究では、図 1 に示す風洞模型を対象とする。図 1 の風洞模型は、東京工芸大学のエッフェル型乱流境界層風洞である。

この風洞模型では、風洞断面が、スパン方向 (y 方向) が 1.2m ($6H$)、鉛直方向 (z 方向) が 1.0m ($5H$) となっている。また、流れ方向 (x 方向) が 11.2m ($56H$) であり、対象となる建物高さが 0.2m ($1H$) となっている。つまり、 $H = 0.2\text{m}$ である。さらに、テストセクションが 2.8m ($14H$) となっている。

比較対象は、①風洞模型実験 (WTE)、②CFD により風洞模型実験を再現したもの (CFD-Precursor)、③乱数を用いて流入境界面での風速変動を生成し、変動流入風を再現したもの (Cholesky) とする。表 1 に本研究で比較する3つの研究手法の使用データを示す。

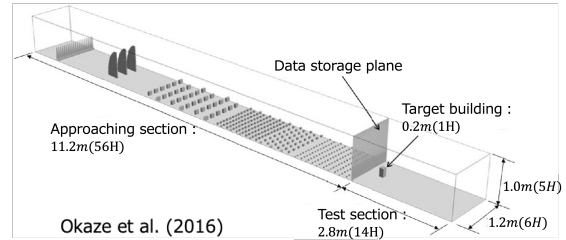


図 1 東京工芸大学エッフェル型乱流境界層風洞

表 1 比較対象となる3つの研究方法

	Name	Time[s]	Measurement Point
①	WTE	60	$z = 0 \sim 0.6\text{[m]}$ を非等間隔に 13 点
②	CFD-Precursor	120	y 方向 122 点 z 方向 142 点
③	Cholesky	90	$z = 0 \sim 0.5\text{[m]}$ を等間隔に 50 点

3. 結果及び考察

3.1. 統計量の結果及び考察

図 2 (a) は、都市部流入方向の風速 u の鉛直プロファイルである。 u_H は、建物高さ $H = 0.2\text{[m]}$ における都市部流入方向の風速である。 z は、鉛直方向の高さである。結果、平均風速 u において、②CFD-Precursor、③Cholesky 共に、①WTE を再現する事がわかった。

図 2 (b),(c),(d) は、風速の偏差である u'_i の標準偏差 $\sigma_{u'_i}$ の鉛直プロファイルである。結果、標準偏差 $\sigma_{u'_i}$ において、①WTE を基準として②CFD-Precursor は過小評価となることがわかった。また、③Cholesky では、 σ_v, σ_w を再現する事がわかった。しかし、 σ_u を再現できない事がわかった。③Cholesky では、①WTE の1次と2次の統計量の値を目標として、変動流入風を作成するため、完全に一致していないと不自然である。

図 3 (a)は、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ 、図 3 (b) は乱流エネルギー e_t のプロファイルである。結果、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ 及び乱流エネルギー e_t において、①WTE を基準として②CFD-Precursor は過小評価となることがわかった。また、③Cholesky では、乱流エネルギー e_t を再現する事がわかった。しかし、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ を再現できない事がわかった。

図 4 (a) は、 u' の歪度 (skewness)、図 4 (b) は u' の尖度 (kurtosis) のプロファイルである。

結果、 $Skewness(u')$ 及び $Kurtosis(u')$ において、①WTE を基準として②CFD- Precursor を再現する事がわかった。しかし、③Cholesky では、 $Skewness(u')$ 及び $Kurtosis(u')$ を全く再現できない事がわかった。

3.2. 確率密度

図 5 (a) は、 u' の確率密度関数 (PDF)、図 5 (b) は u' の累積分布関数 (CDF) のプロファイルである。結果、 u' の PDF 及び u' の CDF において、①WTE を基準として、②CFD- Precursor を再現する事がわかった。しかし、 $z/H = 2.0$ より高い領域では、傾向が異なる事がわかった。また、③Cholesky では、 u' の PDF 再現できないが、 u' の CDF を再現する事がわかった。

図 6 (a) は、 u' の超過風速の相関図である。結果、①WTE との相関は、②CFD- Precursor の方が、③Cholesky よりも強いことがわかった。また、どちらも $N = 99.9\%, 0.1\%$ 超過風速において最も値のばらつきが見られた。

図 6 (b),(c),(d) は、 $z/H = 1.0$ における、パワースペクトル密度 (PSD) の図である。黄線が、“ $-2/3$ power law of Kolmogorov” による直線で、赤線は、カルマンスペクトルを表す。①WTE、②CFD- Precursor、③Cholesky において、PSD のピークが、赤線のカルマンスペクトルのピークと一致している。減衰の様子は、①WTE 及び③Cholesky では黄線に沿うが、②CFD- Precursor では早期に減衰している。

4. 結語

本研究では、都市乱流境界層を対象とした変動流入風作成手法の比較を行った。①WTE を基準として、②CFD-Precursor では平均風速 u 、 $Skewness(u')$ 、 $Kurtosis(u')$ 、 u' の PDF 及び u' の CDF をほぼ完全に再現する事を理解した。③Cholesky では、①WTE の 1 次と 2 次の統計量の値を目標として、変動流入風を作成するため、1 次と 2 次の統計量は完全に再現できるが、その他の指標は再現できない事を理解した。

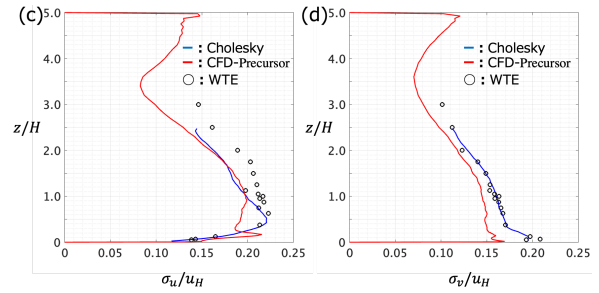
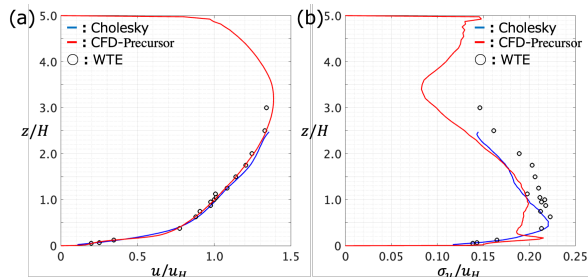


図 2 (a) 平均風速,標準偏差(b) σ_u , (c) σ_v , (d) σ_w ,

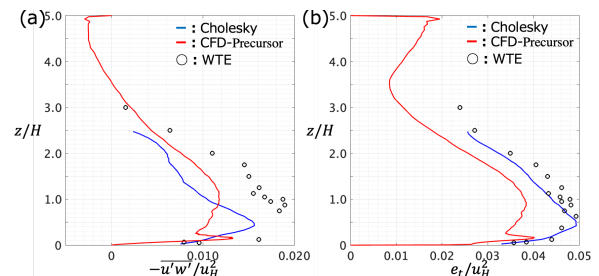


図 3 (a)レイノルズ応力, (b)乱流エネルギー

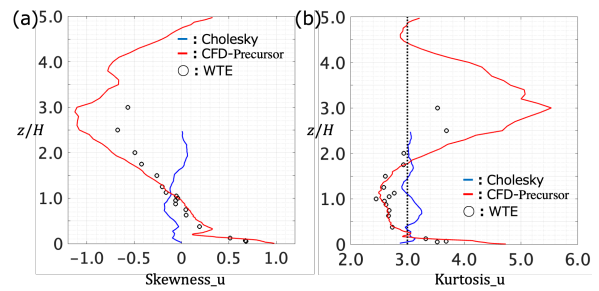


図 4 (a) $Skewness$, (b) $Kurtosis$

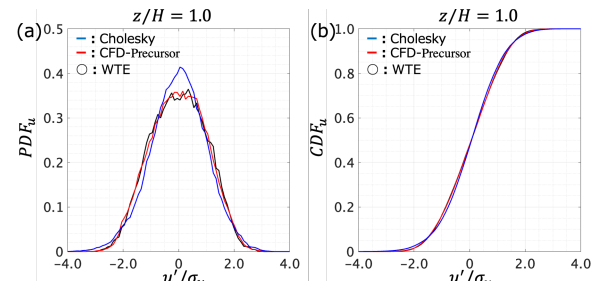


図 5 (a) 確率密度関数, (b) 累積分布関数

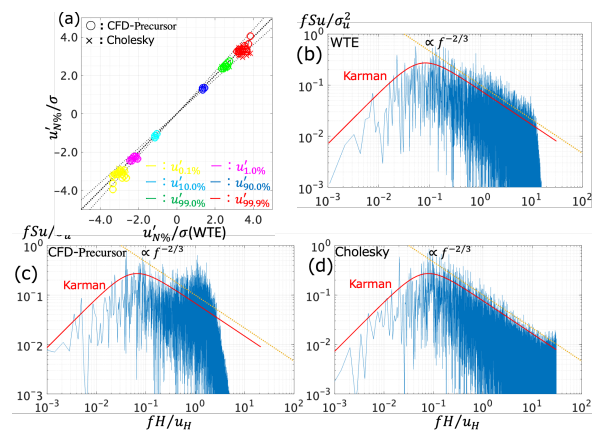


図 6 (a) 超過風速
(b),(c),(d) パワースペクトル密度 (PSD)