

2023 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：2023 年度

課題番号：23232011

研究課題名（和文）：風環境評価のための接近流統計情報と風洞幾何情報のデータベース化に関する研究

研究課題名（英文）：Establishing a database of approaching flow statistics and wind-tunnel geometry for wind environmental assessment

研究代表者：池谷直樹

交付決定額（当該年度）：420,000 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させ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

都市域の歩行者空間の風環境評価では、歩行者安全性の観点から、ビル風などの強風の発生領域を予測することや、都市域での清浄な空気環境を確保するための十分な空気交換の評価することなど、平均的な風速から稀に発生する弱風・強風の高精度な予測が必要である。従来のには、時間平均値を取得するための風洞実験や定常モデルである Reynolds Averaged Navier-Stokes モデルを用いた定常解析が主に用いられてきたが、近年の非定常解析手法と計算機資源の拡充や実験的手法の高時間・空間分解能化に合わせて、どのように瞬間風速を取得し評価するかという点が着目されつつある。このような背景から、本研究課題に参画する研究者グループでは、都市域歩行者空間における風速の発生頻度と強度を確率的に予測する手法を開発することを目的として、乱流境界層流 (Zainol et al. 2022)、単体建物周辺流れ (Wang et al. 2022)、単純建物群周辺流れ (Hirose et al. 2022) など、種々の都市建築物に由来した乱流場を対象として、風速の確率密度モデルと低頻度強風・弱風の評価とモデル化を試みている。

以上のような背景において、歩行者空間の風環境評価に確率的モデルを導入するためには、風洞実験により取得した乱れの乱流特性、長さスケール、確率密度分布、およびパワースペクトル密度を関係付けるための実験データが必要であると推測される。その一方で、従来の風洞実験データは、平均風速や基本統計量など数値解析結果の妥当性検証を主たる目的としたものが多く、これらの風環境評価に確率モデルを導入するための時系列データセットは提供されていない。以上のことから、本研究では、風環境評価に必要な統計情報として、風速基本統計量に加えて、確率密度、パワースペクトル、自己相関関数、積分時間スケールなどを提供するためのデータベースを構築するとともに、確率的に手法により環境評価を行うためのフレームワークを示すことを目的とする。また、今後の風洞装置のデジタルツイン化を見据えて、使用した風洞実験装置を三次元デジタルデータとして保存し、実験データとともに風洞実験装置のデータベースを作成する。

2. 研究の方法

既往研究 (Ali et al. 2023) 粗度区分 III を対象とした接近流および incidental flow の主風速および鉛直風速を X 型熱線流速計により取得した。この速度データについて、統計解析を施すことにより、風速の基本乱流統計量に加えて、積分時間スケール、確率密度、パワースペクトル密度をセットとした実験データベースを構築する。本データを歩行者空間確率密度の基礎データとして、次項の実験によりどのような建物幾何要因が風速の統計情報を変形するのかを分析する。

次に、接近流風速データベースを元に、主風の乱れの長さスケール分布を決定する。生成した接近流から建物基準高さを $H=0.2m$ として、積分長さスケールを基準として模型短辺 L を決定した直方体模型後流の鉛直布ファイル並びに歩行者高さ ($z=0.1H$) スパン方向プロファイルを計測する。接近流の乱れスケールと模型の乱れスケールを重畳させることにより、歩行者高さにおける風速確率密度分布とパワースペクトルの変形に見られる対応を分析する。

また、風洞実験による速度取得に加えて、今後の数値流体解析を見据えた風洞実験データの三次元データベース化を試みる。三次元デジタルデータ化には、三次元デジタルスキャナ (Leica BLK360) を用い、風洞接近流部分における風洞内部、スパイヤー、バリア、ラフネスの質点

データとテクスチャデータの取得を行う。取得したデータは、ポリゴンデータ化することで、数値流体解析にも適用可能な三次元データとして整理する。加えて、当該の三次元データを用いた数値流体解析を実施し、接近流の制限性について議論する。

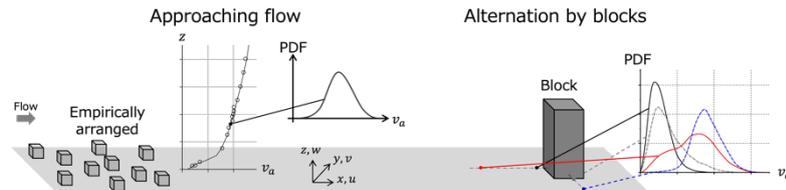


図 1. 研究対象の模式図。接近流の乱れ性状を確率分布として分析した上で、建物が生成する乱れによる確率性状の変化を分析する。

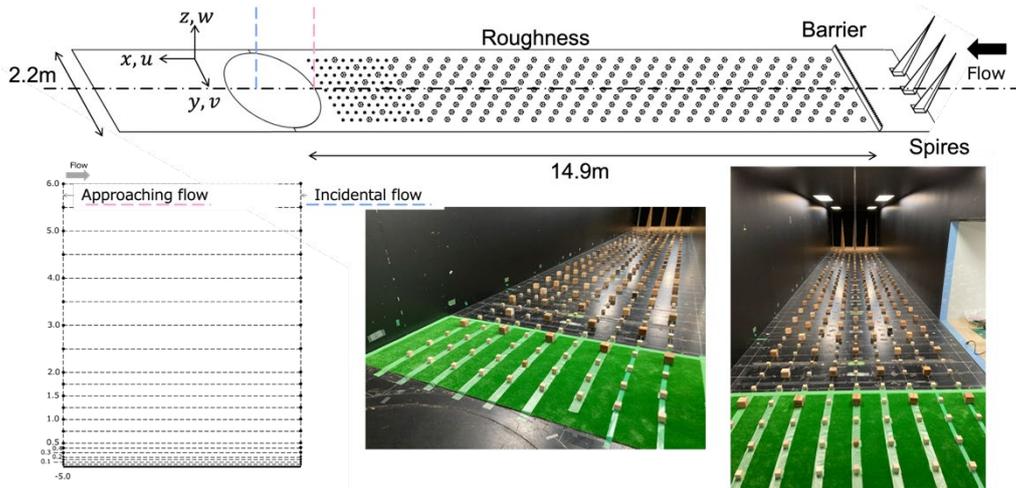


図 2. 接近流の計測位置と乱流生成装置（スパイヤー、バリア、ラフネス）の設置状況と計測高さ。ターンテーブル先端（approaching flow）と中心（incidental flow）を計測位置とした。

3. 研究成果

(a) 建物が生成する乱れに伴う確率密度関数の変化

建物幅 $0.2H$ と $2H$ の異なる幅の模型の後流を対象として、熱線流速形により速度取得を行なった。サンプリングした瞬間風速のデータから各種統計量を取得した上で、確率密度関数を算出し、接近流の確率密度に対する後流の確率密度の変化を分析した。

図 3 には、二つの建物幅の後流の風速の確率密度を示している。スパン方向中心 $y=0$ から、離れる方向に測定位置を変化させて場合の確率密度の変化を調査した。模型後流においては、模型の影響により風速が遅くなることで、平均流が小さくなる様子が見られる。スパン方向に模型中心から離れることにより、徐々に平均風速が大きくなる様子が確率密度のピークから推測される。また、興味深いことに、模型後流と離れた位置での確率密度を比較すると、模型スパン方向中心に近いほど正に歪んだ確率密度分布を示していることがわかる。模型幅 $2H$ の場合には、模型が形成する後流域がスパン方向に広がることに加え、速度欠損も大きくなる。そのため、確率密度のピークが低速側に移動している。一方で、スパン方向に模型中心から離れる位置においては、風速が徐々に回復することで、 $0.2H$ の場合とほぼ同じ確率分布を示している。いずれにおいても、模型の後流部分において平均速度は遅くなるものの、正に歪んだ確率密度を示す傾向にあり、模型の影響により、強風がまれに発生する乱流場が形成されることがわかる。

(b) 建物が生成する乱れによるパワースペクトルの変化

次に、確率密度を算出した測定箇所と同じ風速データについて、パワースペクトル密度を算出し、建物による生成される乱れ成分のスケール別の強度を分析した。図 4 には、模型幅 $0.2H$ と $2H$ の二つの条件における模型後流域スパン方向中心から離れる方向の各測定点でのパワースペクトル密度を示した。模型は幅 $0.2H$ の場合は、模型後流部分で明確なピークシフトが確認される。すなわち、カルマン型のスペクトルに比べて、高周波成分のエネルギー寄与が大きくなっている。一方で、スパン方向に対して模型から離れるほど、カルマン型のスペクトルに近づいている。模型幅 $2H$ の場合には、 $0.2H$ の場合に比べて明確なピークシフトは見られない。

が、カルマン型に比べて若干高周波成分のエネルギー寄与が大きくなっていることが確認される。これらの結果から推測するに、接近流は元々カルマン型のスペクトルかつ正規分布に近い確率密度分布となっている。一方、模型の後流では、模型スケールで生成させる小さいスケールの乱れが元々の接近流の乱れに重畳されることによって、まれに強い風速となる事象が引き起こされ、確率密度を正方向に歪ませるのではないかと推測される。今回の計測では、I型熱線流速計を使用した測定機器の制約から、測定点が模型からかなり離れた位置であることに加えて、速度成分を分離することができなかった。確率密度とパワースペクトルの関係については、今後数値解析を活用するなどして、さらに分析する必要がある。

(c) 3D スキャナーによる風洞デジタルデータ

以上の計測と分析に加えて、接近流を生成した風洞のデジタルデータを記録することを目的として、3D スキャナーを用いた三次元データの保存を行なった。図5には、3D スキャナーの記録データから生成した Point Cloud (点群) による風洞内部と乱流生成装置を可視化した一例を示す。点群データとして保存しているため、数値解析に活用するためには、面データに変換する必要があるが、ラフネス、バリア、スパイヤーの設置位置の情報や風洞の寸法などを読み取ることができる。今後、実験データに加えて、こうした幾何的な実験条件を同時に保存することで、風洞実験と数値解析をこれまでよりも円滑に連動させた研究の実施ができることを期待している。

なお、本成果は、2024年3月4日に東京工芸大学で開催された2023年度風工学拠点・共同利用・共同研究集会において報告した。

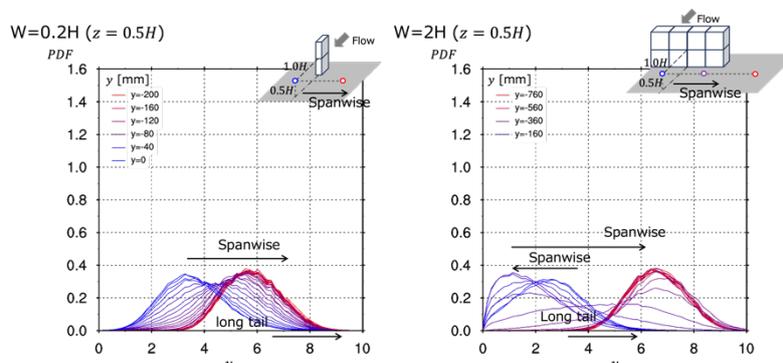


図3. 二種類の異なる建物後流における風速の確率密度関数。図中の w は模型の幅、 H は模型高さ ($=0.2\text{m}$)、 z, y は計測位置を意味する。 $y=0$ は模型スパン方向中心。

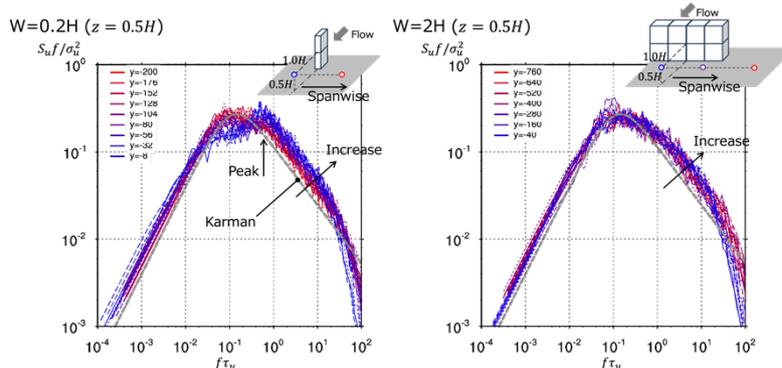


図4. 二種類の異なる建物後流における風速のパワースペクトル密度。図中の w は模型の幅、 H は模型高さ ($=0.2\text{m}$)、 z, y は計測位置を意味する。 $y=0$ は模型スパン方向中心。横軸の周波数は積分時間スケールで無次元化されている。

Point cloud data

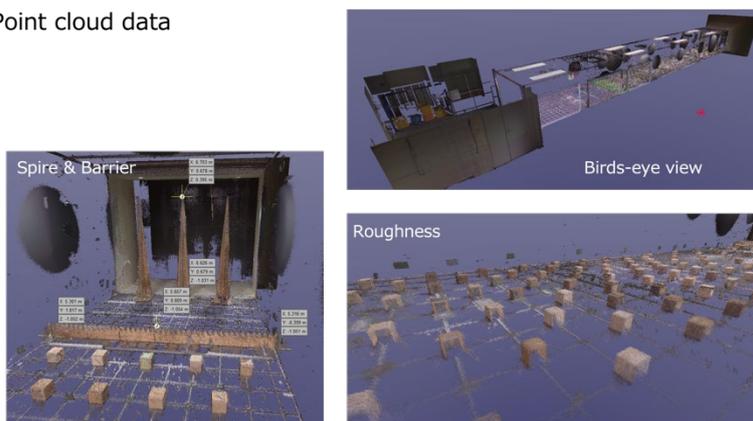


図 5. 3D スキャナーにより取得した風洞全体図と乱流生成装置の配置図. Point cloud データとして、各点には位置情報とテクスチャ（色）情報が含まれている. 可視化のため、ポイントデータを拡大してラフネス等の配置を示している.

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 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

九州大学大学院総合理工学研究院 池谷直樹

(2) 研究分担者

1. 東京工芸大学工学部建築学科 義江龍一郎
2. 福岡県保健環境研究所環境科学部大気課 廣瀬智陽子
3. 九州大学総合理工学研究院 Wang Wei
4. Universiti Teknologi MARA, School of Mechanical Engineering Mohd Faizal Mohamad
5. Universiti Teknologi MARA, School of Mechanical Engineering Azli Abd Razak

参考文献:

- Zainol M.A., Ikegaya N.*, Mohamad M.F., Stochastic and statistical characteristics of artificially generated turbulent flow following Karman spectrum in a wind-tunnel experiment, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 229, 105148, 2022
- Hirose C.*, Nomichi T., Ikegaya N., Distributions of gust and peak factors at pedestrian levels in a simplified urban canopy obtained by particle image velocimetry, *Building and Environment* 222, 109350, 2022
- Wang W., Seta K., Ikegaya N., Modelling probability density functions based on the Gram-Charlier series with higher-order statistics: theoretical derivation and application, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 231, 105227, 2022
- Ali N.M., Ikegaya N.*, Mohamad M.F., Wei W., Hirose C., Quantifying natural cross-ventilation flow of a simplified two-layered terraced house used in tropical zones by particle image velocimetry, *Building and Environment*, *Building and Environment* 244, 110829, 2023

6. 要約 (Abstract, 英文)

Research Theme : Establishing a database of approaching flow statistics and wind-tunnel geometry for wind environmental assessment

Representative Researcher (Affiliation) : Naoki Ikegaya (Kyushu University)

Summary • Figures

The pedestrian-level wind environment of urban areas is a key research question for pursuing better outdoor environment. Recent studies focus on the probabilistic nature of the airflow in built environment using fundamental statistics, probability density functions, and power spectral densities. However, the relationship between these statistics and turbulent characteristics have not been revealed yet, especially for the key factor to determine the shape of the probability density. Therefore, this study investigates the correlation of the power spectral densities and probability densities of the wake flow of two types of the blocks whose length scales are comparable of that of the turbulent length scale of the turbulent approaching flow. The results show that the probability density functions within the wake skews in the positive side, implying the rare but strong wind speeds occurs within the wake. Accordingly, the power spectral densities clearly showed the generation of smaller scale turbulences than those of the energy containing eddies of the approaching flow. The outcomes imply that the skewed probability density is probably generated by the superimposition of the small-scale turbulence due to the separation by the block on the turbulences of the approaching flow.

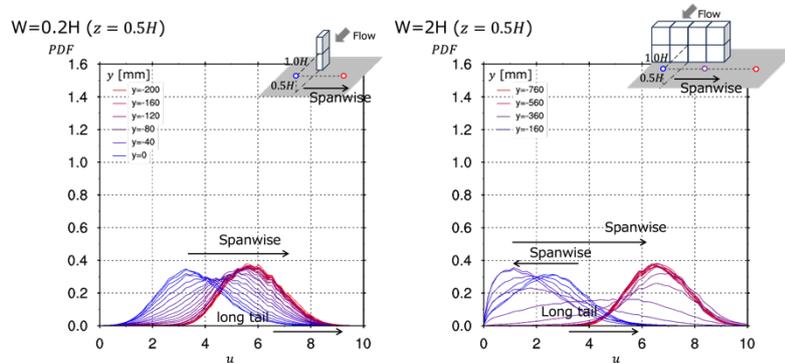


Fig.1 Probability density distributions of the wind speed within the wake of two types of blocks with the width of $0.2H$ and $2H$ at different spanwise locations.