

# 大型マルチファン風洞と動的格子を融合した多自由度風洞による大気乱流制御技術の構築

秋田大学大学院理工学研究科共同サステナブル工学専攻 講師  
高牟礼 光太郎

## 1. はじめに

本研究は、大気乱流の間欠性を有する非定常な自然風を風洞内で再現するシステムを構築することを目的として実施した。大気乱流の間欠性は、突風や局所的な強風として生活圏の構造物に作用し、風力発電設備、高層建築物、屋外構造物等の安全性評価において重要な因子となる。従来の大型風洞では、単独の大型ファンを用いた定常的な送風が中心であり、時間的・空間的に大きく変動する自然風の再現には限界があった。

本研究では、多数の小型ファンを面的に配置したマルチファン型風洞に動的格子を組み合わせ、さらにフィードバック制御と最適化技術を導入することで、目標とする自然風を実験室内で自在に生成する多自由度風洞の実現を目指した。本助成期間には、その基盤として、(1)小型マルチファン型風洞によるファン駆動制御システムの検証実験、(2)フィードバック制御を用いた壁面境界層の再現、(3)大型乱流風洞の移設・設置作業を実施した。以下に、得られた成果を報告する。

## 2. 小型マルチファン型風洞によるファン駆動制御システムの検証実験

大型マルチファン型風洞の制御系を構築する前段階として、5×5配列の計25基のファンを独立に制御できる小型マルチファン型風洞（図1）を構築し、装置構成、配線、駆動プログラムおよび計測手法を検討した。装置は、マルチファンユニット、メッシュ、セル、ハニカム、試験部から構成し、ファンから生じる速度むらや方向成分を整流しながら、試験部において生成した流れを評価できる構成とした。計測には熱線流速計を用い、トラバース装置により主流方向に複数点の速度時系列を取得した。



図1 小型マルチファン型風洞（左：マルチファンユニット，右：試験部）

制御系の全体像を図2に示す。制御系は、Raspberry Pi, PCA9685型PWMドライバ2台、24V電源群および25基のDCファンで構成した。各ファンにPWM信号を個別に入力すること

で、ファンごとに回転指示レベルを変更できる。これにより、全ファンを同位相で駆動する 1 位相条件、奇数・偶数ファンに逆位相の正弦波を入力する 2 位相条件、5 種類の位相を空間的に配置する 5 位相条件、25 基すべてに異なる位相を与える 25 位相条件を設定した。いずれの条件でも、回転指示レベルはおおむね 15~95% の範囲で周期的に変化させ、1 Hz 程度の速度変動を発生させた。

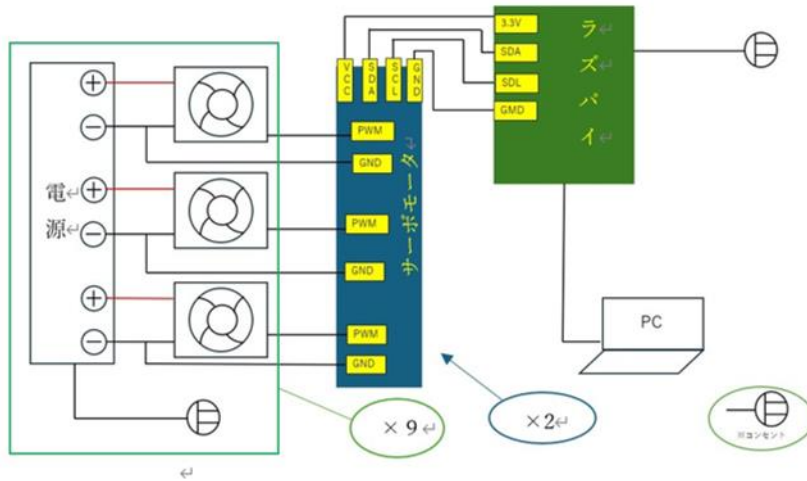


図2 ファン駆動制御システムの構成

入力信号の再現性を評価するため、上流側の速度時系列に対して正弦波フィッティングを行い、その結果を図3に示す。得られた代表値は平均流速約 5.7 m/s、変動振幅約 1.55 m/s、支配周波数約 1.02 Hz であり、測定信号は目標とする周期変動を高い精度で再現した。さらに、図4に示すように、平均流速の主流方向変化を確認したところ、下流側では約 5.4 m/s の一定値に収束し、実験装置として安定した主流を形成できることが確認された。

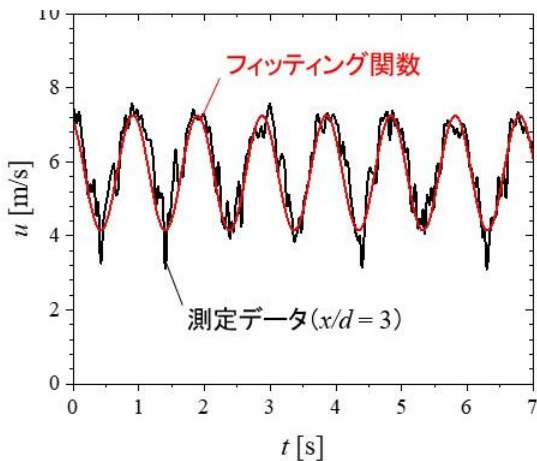


図3 入力信号とフィッティング関数の比較

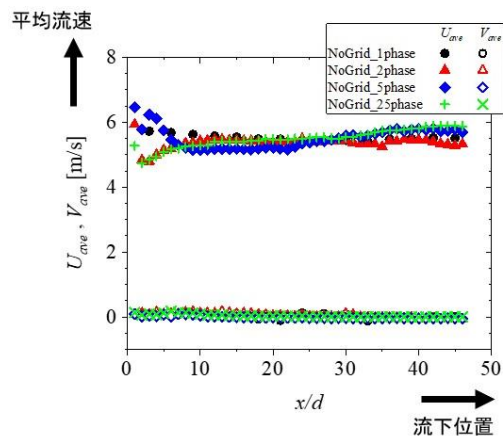


図4 平均流速の主流方向変化

以上の検証実験により、ファンを個別に駆動するための電源・信号配線、PWM ドライバのアドレス設定、Raspberry Pi からの制御プログラム、熱線流速計による時系列評価の一連の手順を確立した。

### 3. フィードバック制御を用いた壁面境界層の再現

次に、ファン駆動制御によって壁面境界層を能動的に再現する実験を行った。従来の大気境界層風洞実験では、スパイヤー、ラフネス、角柱列などの受動的な障害物を用いて境界層を発達させる方法が広く用いられている。例えば、マルチファンを平均速度プロファイルの形成に用い、角柱列やラフネスを乱れの供給源として組み合わせる方法が提案されてきた。一方、この方法では、目標条件を変更するたびに障害物配置を調整する必要があり、試行錯誤や長い流下距離が必要となる。

本研究では、測定部内にラフネス等の障害物を設置せず、ファンの駆動条件だけを調整することにより、壁面境界層に特徴的な平均速度勾配と速度変動場の再現を試みた。具体的には、目標とする平均速度分布および乱れ強度分布を与え、熱線流速計で得られた実測値との差に基づいて各ファンの入力信号を更新した。これを反復することで、壁面近傍の低速領域から外層の高速領域に至る平均速度勾配を形成し、同時に乱れ強度や速度時系列の統計量を目標に近づけた。

図5に、マルチファン風洞によって再現した境界層の平均速度分布と目標値を併せて示す。実験の結果、非常に短い助走距離において、ファン駆動のみでも壁面境界層の平均速度勾配を再現できることを確認した。特に、壁面近傍で流速が低く、上方に向かって流速が増加する境界層型のプロファイルを、ラフネスや角柱列を用いずに形成できた。

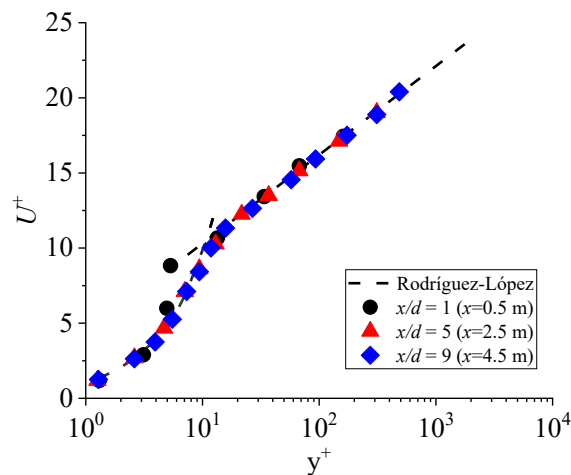


図5 境界層平均速度分布の再現結果

次に、速度変動の大きさや時系列の乱れ方も制御対象とすることで、境界層内の速度変動場の再現を目指した。図6に変動速度の断面分布を示す。この分布は、ファンの変動駆動を調整することで得られた。この結果、上流側 ( $x/d \leq 2.5$ ) では目標値からのずれが見られるが、 $x/d=9$  ( $x=4.5$  m) の地点において目標値にほぼ一致することが分かった。以上より、本風洞では、流れの平均速度分布だけでなく、変動速度分布までファン駆動制御により再現できることを明らかにした。

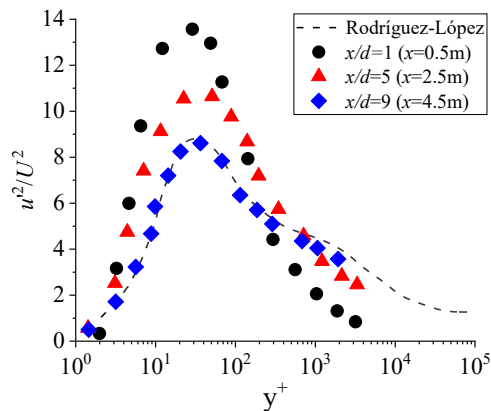


図6 境界層変動速度分布の再現結果

これらの成果は、風洞内に固定された受動的要素を設置せず、ソフトウェア上の制御パラメータを変更するだけで異なる境界層条件を作り分けられる可能性を示している。従来は実験条件ごとにラフネスや格子の製作・再配置が必要であったが、本手法では、ファン駆動条件の更新により平均場と変動場を同時に調整できる。したがって、複雑地形上の風況や突風を模擬する多自由度風洞において、フィードバック制御を用いた能動的な流入境界制御が有効であることが示された。一方で、乱流を特徴づけるパラメータとして、レイノルズ応力や空間相関など、より高次の統計量まで再現する必要がある。これらの再現には機械学習の活用が有効と考えられるため、次に説明する大型風洞の移設後に実装を試みる計画である。

#### 4 大型乱流風洞の移設・設置作業

本助成では、大型乱流風洞を大分工業高等専門学校から秋田大学へ移設する作業を実施した。移設にあたっては、風洞本体および測定胴の搬出、輸送、搬入、設置場所の確保、電源・安全面の確認を順次進めた。図7に風洞装置の搬入の様子を示す。大型装置であるため、搬入先の部屋では設置荷重を考慮した床補強を行い、風洞を安定して運転できる実験環境を整備した。現在、風洞本体の秋田大学への移設は完了しており、以下にその状況を述べる。

移設した大型マルチファン型風洞は、縦11個×横6個のファンを搭載する計画の装置であり、今後、個別ファン制御と動的格子を組み合わせることで、大型試験部内に高レイノルズ数の非定常乱流場を生成する(図8参照)。移設後は、まず中心部のファンから整備を進めた。近年のサーボモーター価格の高騰により、本助成期間内では中心4基の整備にとどまったが、制御系の基本構成を確定し、今後の段階的な整備・拡張に向けた作業基盤を整えることができた。



図7 大型乱流風洞の移設作業の様子（秋田大学 種平キャンパス）



マルチファンのファン部の様子  
（縦11個×横6個）

縮流部の様子

図8 大型マルチファン型風洞の様子

## 5. 今後の展望

本研究で得られた第一の成果は、小型マルチファン型風洞によって、ファンを個別駆動するための装置構成と制御手法を事前に検証できたことである。特に、位相差を持つファン駆動が入力周期成分を乱流成分へ変換し、位相数の増加によって等方性の高い乱流場に近づくことを確認した点は、大型風洞の運転条件設計に直結する。

第二の成果は、フィードバック制御を用いることで、ラフネスを用いずに壁面境界層の平均速度勾配および速度変動場を再現できたことである。これは、受動的な格子・ラフネスの交換に依存していた従来の風洞実験から、制御信号の更新によって流れ場を作り分ける能動的な風洞実験への転換を示す成果である。

第三の成果は、大型乱流風洞の移設・設置を完了し、秋田大学における多自由度風洞研究の実験基盤を整備できたことである。サーボモーターの整備・拡張を継続することで、今後は大型断面を生かした高レイノルズ数乱流の生成、動的格子との統合、機械学習・最適化を用いた自然風再現に発展させることができる。これにより、風力発電設備、建築構造物、都市風環境などの安全性評価に資する実験技術の確立が期待される。

## 6. まとめ

本助成により、大型マルチファン型風洞と動的格子を融合した多自由度風洞の構築に向け、制御系の事前検証、ファン駆動による境界層再現、大型風洞の移設・設置を進めた。小型風洞では、25基のファンを独立に駆動し、位相差入力によって乱流化を促進できることを確認した。フィードバック制御では、ラフネスを用いずに壁面境界層の平均速度勾配と速度変動場を再現することに成功した。さらに、大分高専から秋田大学への大型乱流風洞の移設を完了し、中心4基のファンの整備を通じて今後の拡張に向けた基盤を整えた。

今後は、全ファンのサーボモーター整備と校正を進め、動的格子を導入した乱流生成実験を実施する。また、目標風況データを対象としてフィードバック制御と最適化を組み合わせることで、実環境に近い大気乱流を大型風洞内で再現する技術へ発展させる。

### 謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2025年研究助成を受けて実施されました。

### 参考文献

- 1) 上野剛史, 小園茂平, 岩田直哉, 「マルチファン型風洞による厚い境界層の再現」, 風工学シンポジウム論文集, 20, 11-16, 2008.
- 2) 榊原祥真, 「高レイノルズ数乱流場の生成を目的としたマルチファン型風洞の開発」, 秋田大学工学部卒業論文, 2025.