

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 20 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 秋田大学大学院理工学研究科

氏 名 : 高牟礼光太郎

研究課題名 : 多自由度風洞と最適化技術を駆使した大気乱流制御技術の開発

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 31 日

多自由度風洞と最適化技術を駆使した大気乱流制御技術の開発

Development of turbulence control technology using multi-degree-of-freedom wind tunnel and optimization technology

秋田大学大学院理工学研究科 准教授 高牟礼 光太郎

(研究計画ないし研究手法の概略)

開発した風洞は、図1に示すように、 5×5 配列の計25基のDCファンからなる。図2に風洞の構成を示す。風洞は、マルチファンユニット、メッシュ・セル・ハニカムで構成される整流部、および流れを観測する試験部から構成される。各ファンを個別に制御することで、従来の単一ファン風洞や格子風洞では再現が難しい非一様・非定常流を生成できる点が特徴である。整流部では、メッシュが風速むらを平滑化し、セルがファン間の干渉を抑制し、ハニカムが流れの方向成分をそろえることで、制御入力に対応した流れ場を安定して試験部へ導く。



図1:ファンの様子

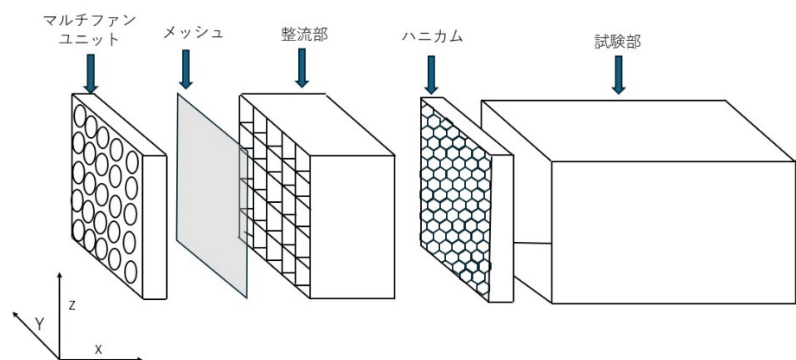


図2:風洞の構成図

図3にファンの接続回路を示す。送風機には24V駆動のSan Ace 80を採用し、2台のPCA9685サーボモータドライブを介して25基すべてのファンにPWM信号を個別に与えられる構成とした。制御演算にはRaspberry Pi 4 Bを用い、I2C通信を通じて複数ドライバを同時に扱うことで、多数ファンの同期・非同期駆動を簡潔な構成で実現した。さらに、電源系、共通GND、アドレス設定を整理することで、安定した独立制御系を構築した。

風洞の計測には熱線流速計を用い、試験部内に設置した三軸トラバース装置によりプローブ位置を移動させた。計測は上流から下流方向へ80 mm間隔で実施し、1条件あたり46点のデータを取得した。これにより、生成した流れ場の主流方向発達を詳細に評価できるようにした。

ファンの制御は、Raspberry Piに実装したPythonプログラムにより行い、25基のファンのPWM信号を個別に操作することで回転数を制御した。表1に入力信号の概要を示す。入力信号には正弦波を用い、回転指示レベルを15~95%の範囲で変化させた。また、位相の与え方を変えた4種類の制御パターンを設定し、全ファン同位相、奇数・偶数ファンの逆位

相，5 位相分散配置，25 位相分散配置を順次適用した．これにより，流れ場に与えるせん断や空間的不均一性を調整し，乱流生成条件を系統的に変化させた．

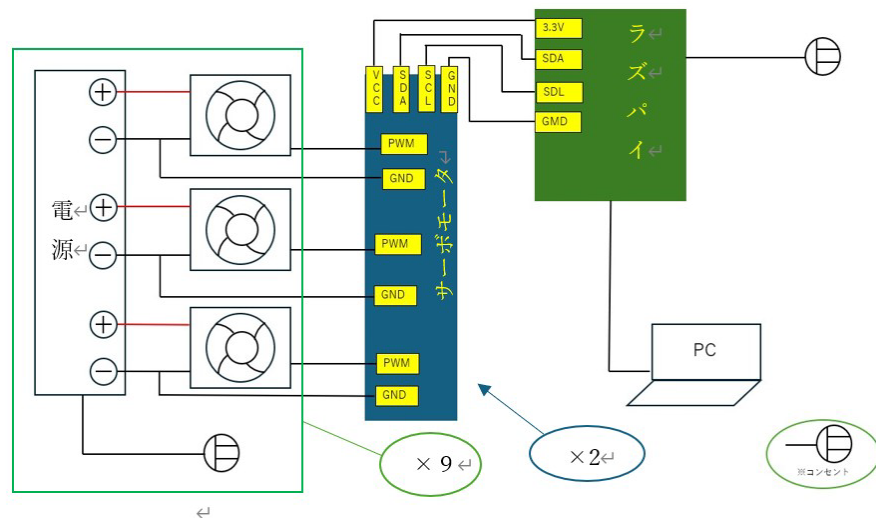


図 3：ファン制御系の回路図

表 1 設定した駆動条件

条件	構成
1 位相	全 2 5 ファンに同一の正弦波を入力
2 位相	奇数・偶数番号ファンを逆位相で駆動
5 位相	5 種類の位相を空間的に分散配置
2 5 位相	2 5 種類の位相を各ファンへ割り当て

評価指標としては，入力信号の正弦波フィッティングによる再現性確認，中心断面における平均流速分布，乱れ強度，主流方向と鉛直方向の乱れ強度比に基づく等方性を用いた．これにより，位相差制御が流れの乱流構造へどのように寄与するかを把握した．

（実験調査によって得られた新しい知見）

生成した流れ場の評価には，熱線流速計を試験部内のトラバース装置に搭載し，上流から下流方向へ 80 mm 刻みで移動させながら計測を行った．まず，入力信号の再現性を確認するため，ハニカムから 0.3m 下流における中心断面の速度信号に対して正弦波フィッティングを行った（図 4）．その結果，平均流速 5.7 m/s，振幅 1.55 m/s，周波数 1.02 Hz の周期変動が得られ，測定信号と理想正弦波との高い一致が確認された．加えて，入力信号と計測結果の相互相関 r を見積もったところ，同位相において $r=0.93$ という高い相関値を示した．このことから，本風洞は目標とする周期流を十分な精度で再現できることが示された．

次に，位相差パターンが流れ場に与える影響を調べた．平均流速の主流方向分布を見ると（図 5），下流側ではいずれの条件でも約 5.4 m/s の一定値に近づき，装置として安定した平均流れが形成されていることが確認された．一方で乱れ強度の挙動（図 6）は位相条件によって大きく異なった．1 位相条件ではファン間の速度勾配が小さいため乱流化が十分に進まず，入力した周期変動が下流まで残存した．これに対し，位相数を増やした条件では，多様

なせん断が形成されることで乱流化が促進され、主流方向の周期成分は次第に小スケールの乱れへと移行し、粘性散逸によって減衰した。また、鉛直方向の乱れ強度（図7）は位相数の増加とともに増大しており、主流方向に与えた変動が他方向へ輸送されていることが示唆された。これは、流れ場がより三次元的かつ乱流的な状態へ移行していることを意味する。

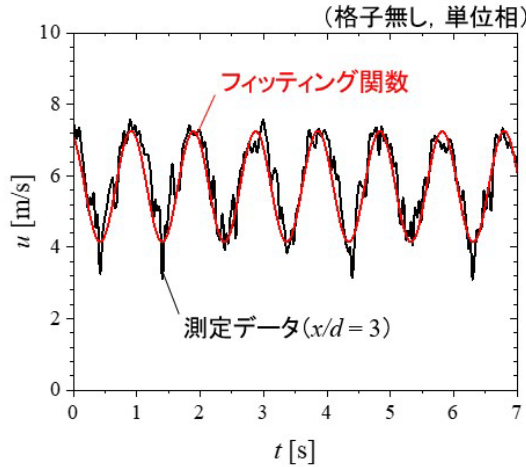


図4：フィッティング関数と計測データの比較

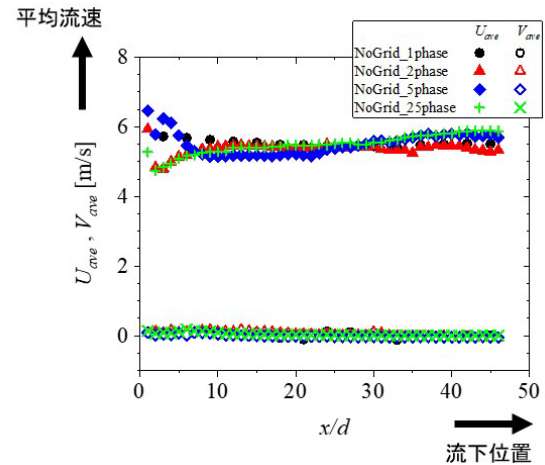


図5：主流方向平均流速の主流方向変化

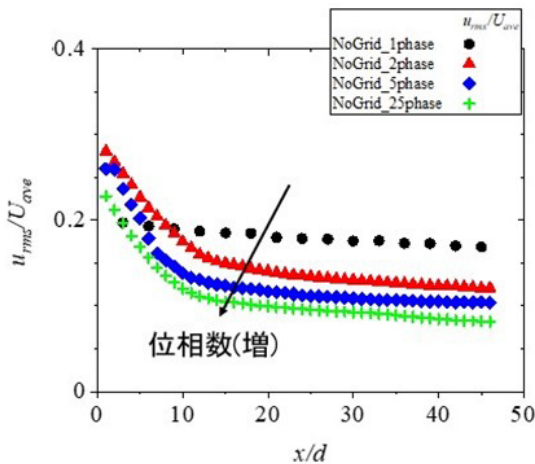


図6：主流方向乱れ強度の主流方向変化

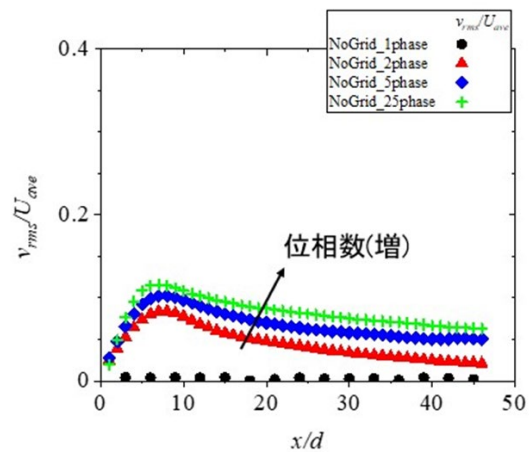


図7：鉛直方向乱れ強度の主流方向変化

さらに、等方性の評価（図8）からも、位相数の増加が乱流場の発達に有効であることが示された。2位相条件では入力信号由来の主流方向変動が強く残存し、変動が一方向に偏るため異方性が強い。一方、5位相条件および25位相条件では、主流方向に入力されたエネルギーが他方向へ再分配され、等方性は1に近づいた。特に25位相条件では、入力信号と流速変動の相互相関係数のピークが約0.1まで低下しており、下流では入力波形の情報がほとんど残っていないことが確認された。この結果は、位相差を増やすことによって入力された周期流が乱流へと効率的に変換され、より発達した乱流場が生成されることを示している。

以上より、本研究で整備したマルチファン型風洞は、25基のファンを独立制御することで、単純な周期流から複雑な乱流場までを段階的に生成できる有効な実験基盤であることが示された。特に、位相数を増加させることで乱流化が促進され、入力信号に依存した周期変動を下流で減衰させつつ、より等方的な乱流場を形成できることが明らかとなった。本成果

は、多自由度風洞を用いた大気乱流の模擬および制御に向けた基礎的知見を与えるものであり、今後は格子の併用や位相配置の高度化や AI 制御の導入により実現し、より高レイノルズ数かつ実環境に近い乱流場の生成へ展開する予定である。

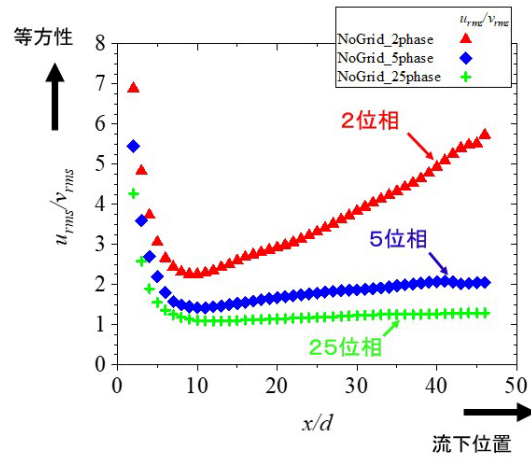


図8：等方性の主流方向変化

(発 表 論 文)

1. Shoma Sakakibara, Zhang Jindi, Kotaro Takamure, Takahiro Adachi, Effect of Periodic Flow with Phase Difference Generated by Two Fans on Flow Development, Proc. of 18th Asian Congress of Fluid Mechanics, 4pages (online)