



京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University

一般共同研究
2021G-11

マルチファンを立体配置したドーム風洞による 台風時の複雑な風況再現

Simulation of unsteady strong wind under typhoons
using a geodesic dome wind tunnel with multiple fans

令和 5 年 5 月

May, 2023

研究代表者

友清衣利子

Principal Investigator

Eriko TOMOKIYO

【報告書（概要）】

令和5年4月26日

該当する研究種目にチェックしてください。

- ☒ 一般共同研究
☐ 国際共同研究（一般、特定）
☐ 長期・短期滞在型共同研究
☐ 地域防災実践型共同研究（一般、特定）
☐ 萌芽的共同研究
☐ 重点推進型共同研究
(課題番号： 2021G-11)

京都大学防災研究所長 殿

[申請者（研究代表者）]

氏 名：友清 衣利子

職 名：教授

所属機関名：熊本大学大学院先端科学研究部

下記のとおり、共同研究の実施結果について報告します。

記

課題名：マルチファンを立体配置したドーム風洞による台風時の複雑な風況再現

研究代表者：友清 衣利子

所属機関名：熊本大学

所内担当者名：西嶋 一欽

研究（滞在）期間：令和3年4月1日 ～ 令和5年3月31日

研究（滞在）場所：熊本大学、神戸大学、京都大学防災研究所

共同研究参加者数：4名（所外3名，所内1名） ※別紙参加者名簿を添付してください。

研究及び教育への波及効果について

研究面では、現実的な風速場を再現した縮尺模型実験実施の可能性を開拓するとともに大型マルチファン風洞（実大ストームシミュレータ）の要素技術に資する知見を創出した。教育面では、風洞装置の製作を通じて、自然風の特徴および風洞実験手法に関する基本的な知識を習得させることができた。

研究報告

(1) 目的・趣旨

台風時の強風は、台風の移動に伴い風速と風向が大きく変化するだけでなく、強い乱れを持ち、その風速プロファイルは鉛直方向だけでなく三次元的に分布している。一般的な風洞設備では三次元的な風向変動や台風時のような強い乱れと地表面粗度によらない風速分布を再現することは難しい。台風強風下での複雑な風況を再現する風洞装置があれば、風洞実験によって強風下での住宅周りの気流性状と風圧分布を明らかにし、被害の拡大メカニズムをより実的に分析することができ、被害低減対策の提案が可能となる。本研究は、風向風速が三次元的に時々刻々と変化する台風の自然強風下での、地上付近の複雑な風況を再現できる風洞設備を作成し、台

風時の強風風圧による住宅被害拡大プロセスを明らかにすることを目的とする。

(2) 研究経過の概要

ドームを形成する角度の異なる複数の面から風を流入させるために、マイコンを用いて同時に複数の軸流ファンの回転数を制御する手法を検討した。また、軸流ファン（正方形断面）からドームの流入面（三角形面）までを接続して整流と縮流を行う小型送風洞を作成し、送風洞の気流性状を確認した。さらに、アルミ材を接合し、ドームフレームを作成するとともに小型送風洞との接続方法を検討し、風向と風速の異なる流入風をドーム内部に流入させる装置を作成した。一方で、数値流体解析により、ドームの三角形面から異なる風速の気流を流入させてドーム内部に生成される風速変動の再現性を確認し、流入面での風速制御の方法を検討した。

(3) 研究成果の概要

3D プリンタで成形した小型送風洞により、軸流ファンで生成される旋回流をドームに流入する三角形面までで拡散と整流、縮流し、おおむね一様な気流に生成することができた。また、入力電圧を変化させることでファンの出力を周期的に変化させ、高周波領域の乱れを除く周期的な風速変化を生み出せることを確認した。一方で、数値流体解析により、角度の異なる複数の流入面からの流入気流のバランスを調整してドーム内部に生成される風況を確認した。流入面の位置や流速を調整することで、ドーム中央付近で目標とする自然風の風向風速変化に対応する気流を再現できた。しかし、高周波数域の風速変動は、数値流体解析、風洞実験ともに再現が難しく、さらなる検討が必要である。

(4) 研究成果の公表

- 1) 友清衣利子，西嶋一欽，竹内崇：3次元風況を再現するドーム風洞のためのマルチファンの制御と設置方法の検討，令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会，2022. 2.
- 2) 宮本洋太，友清衣利子，西嶋一欽，竹内崇：ドーム型マルチファン風洞のための流入風の整流および縮流装置の設計，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 125-126，2022. 9.
- 3) 竹内崇，友清衣利子，西嶋一欽：数値流体計算によるドーム型風洞内の風況制御方法の検討，令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会，2023. 2.
- 4) 宮本洋太，友清衣利子，西嶋一欽，竹内崇：ドーム型マルチファン風洞のための小型送風洞の性状把握，日本建築学会大会（近畿）学術講演会，2023. 9.（口頭発表予定）
- 5) Takeuchi Takashi, Eriko Tomokiyo, Kazuyoshi Nishijima: Development of a method to control wind conditions in a dome-shaped wind tunnel using CFD simulations, Proc. of 16th International Conference on wind Engineering, 2023. 8.（ポスター発表予定）
- 6) Takeuchi Takashi, Eriko Tomokiyo, Kazuyoshi Nishijima: Development of a method for controlling two horizontal wind velocity components in a dome-shaped wind tunnel using CFD simulations. (Wind and Structures, An International Journal（査読付き国際誌）に投稿予定）

本報告書は、京都大学防災研究所一般共同研究（課題番号：2021G-11）の助成を受け、下記の研究組織により実施された研究成果をまとめたものである。なお、研究成果の取りまとめにあたって、関連する下記の研究成果 1)～5)の一部を加筆修正、再構成した。

研究組織

研究代表者

友清衣利子 熊本大学大学院先端科学研究部・准教授

研究分担者

西嶋一欽 京都大学防災研究所・准教授

竹内崇 神戸大学大学院工学研究科・准教授

研究成果

- 1) 友清衣利子，西嶋一欽，竹内崇：3次元風況を再現するドーム風洞のためのマルチファンの制御と設置方法の検討，令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会，2022.2.
- 2) 宮本洋太，友清衣利子，西嶋一欽，竹内崇：ドーム型マルチファン風洞のための流入風の整流および縮流装置の設計，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.125-126，2022.9.
- 3) 竹内崇，友清衣利子，西嶋一欽：数値流体計算によるドーム型風洞内の風況制御方法の検討，令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会，2023.2.
- 4) 宮本洋太，友清衣利子，西嶋一欽，竹内崇：ドーム型マルチファン風洞のための小型送風洞の性状把握，日本建築学会大会（近畿）学術講演会，2023.9.（口頭発表予定）
- 5) 安永奏，ドーム型マルチファン風洞作製のためのマイコンによる複数ファン制御手法の構築，熊本大学工学部建築学科令和3年度卒業論文，2021.12.

目次

1. 研究の目的	1
2. ドーム風洞の概要	1
3. 複数ファンの制御手法の構築	2
3.1 ファンの制御システム	2
3.2 風洞実験によるファンの応答確認	3
3.2.1 簡易風洞実験概要	3
3.2.2 duty 比とファンの回転数の関係	5
4. ドームを構成する小型送風洞の作製と特性把握	6
4.1 送風洞の試作(プロトタイプ 1)	6
4.2 小型送風洞(プロトタイプ 1)の性状確認	7
4.2.1 実験方法	7
4.2.2 実験結果	7
4.2.3 実験結果のまとめ	9
4.3 送風洞の試作(プロトタイプ 2)	10
4.4 小型送風洞(プロトタイプ 2)の性状確認実験	11
4.4.1 実験方法	11
4.4.2 実験結果	12
4.4.3 実験のまとめ	14
5. 数値流体計算によるドーム型風洞内の風況制御方法の検討	14
5.1 数値流体解析の目的	14
5.2 解析概要	15
5.3 風速制御手法	16
5.4 風速制御手法の検証結果	17
5.5 数値解析のまとめ	18
6. まとめ	19
参考文献	19

1. 研究の目的

2018年に近畿地方を襲った台風21号や令和元年房総半島台風などによって、住宅密集地では多くの住宅が被災した。台風時の強風は、台風の移動に伴い風速と風向が大きく変化するだけでなく、強い乱れを持ち、その風速プロファイルは鉛直方向だけでなく三次元的に分布している¹⁾。一般的な風洞設備で再現する境界層乱流は、地形の影響や地表面粗度を考慮した風速および乱れの強さの鉛直プロファイルを作成し、風向は一方向のみとなる。既存の風洞装置で三次元的な風向変動や台風時のような強い乱れと地表面粗度によらない風速分布を再現することは難しい。台風強風下での複雑な風況を再現する風洞装置があれば、風洞実験によって強風下での住宅周りの気流性状と風圧分布を明らかにし、被害の拡大メカニズムをより实际的に分析することができ、被害低減対策の提案が可能となる。

風向風速が三次元的に時々刻々と変化する台風の自然強風下での、地上付近の複雑な風況を再現できる風洞設備を作成し、台風時の強風風圧による住宅被害拡大プロセスを明らかにすることを目的とする。

本研究では、ドームに複数のファンを立体配置した風洞装置を試作し、風向風速が3次元的に時々刻々と変化する台風の自然強風下での、地上付近の複雑な風況の再現を目指す。

2. ドーム風洞の概要

本研究で開発するドーム型マルチファン風洞はジオデシックドームの各面にファンを取り付け、ドーム内の風向風速の3次元的制御を試みる。風洞の概要図を図1に示す。正三角形とその正三角形の1辺を底辺に持つ二等辺三角形による40面の三角形で構成される仮想的な半球のドームに対して、19面を流入、16面を流出部とする。上部の5面は観測窓として利用する。流入面には一様な風が流入するように、送風用の軸流ファンから拡散、整流および縮流を行う流路を製作して接続する。以下、この流路を送風洞とする。

本研究では、ドームの直径が600mm程度の風洞の製作を目指し、一辺が約168mmの正三角形と1辺が168mmで2辺が150mmの二等辺三角形を組み合わせでドームを形成する。ドームフレームの概形を図2に示す。19の流入面に対して1つ以上の軸流ファンを設置し、個別に制御を行う必要があるため、本研究ではマイクロコンピュータでファンの制御を試みる。

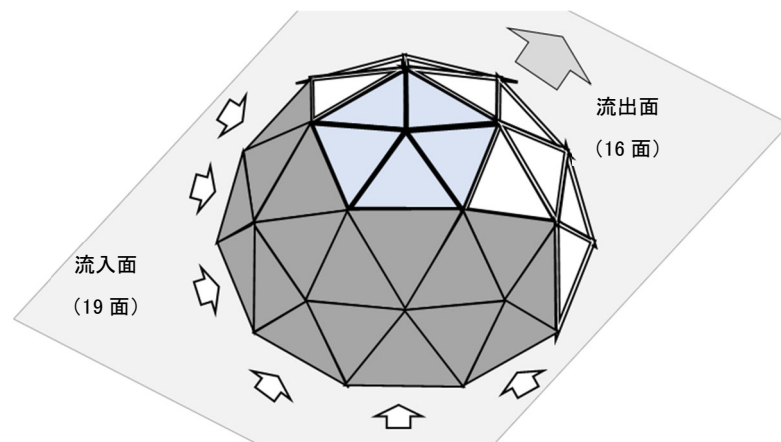


図1 ドーム型マルチファン風洞のイメージ



図 2 マルチファンの風洞フレーム

3. 複数ファンの制御手法の構築^{*1}

3.1 ファンの制御システム

上述した通り、複数のファンを能動的に制御する必要があるため、マイクロコンピュータ (Arduino) を用いて PWM 制御による 3 つのファンの同時制御を試みた。システム概要図を図 3 に、図 4 に回路図を示す。Arduino の PWM 出力端子は 5 つあり、5 つのファンを同時制御できるが、最終的にさらに多数のファンを制御することを前提に 16 チャンネルの PWM 出力ドライバを搭載した PCA9685 を利用した。なお、ファンの回転数を制御するだけでなく、制御の精度を確認するためにファンが出力するパルス幅を読み取り、ファンの回転数を記録した。

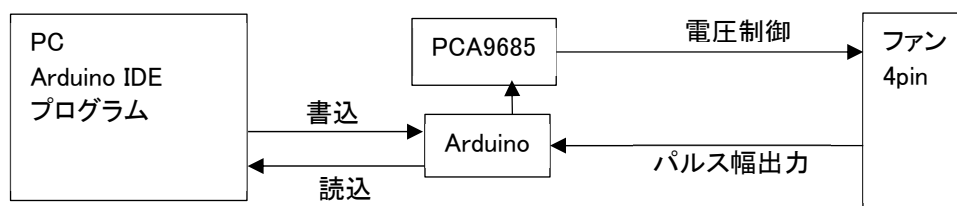


図 3 Arduino によるファン回転数制御の概要

^{*1} 研究成果 1)および 5)に加筆，修正した。

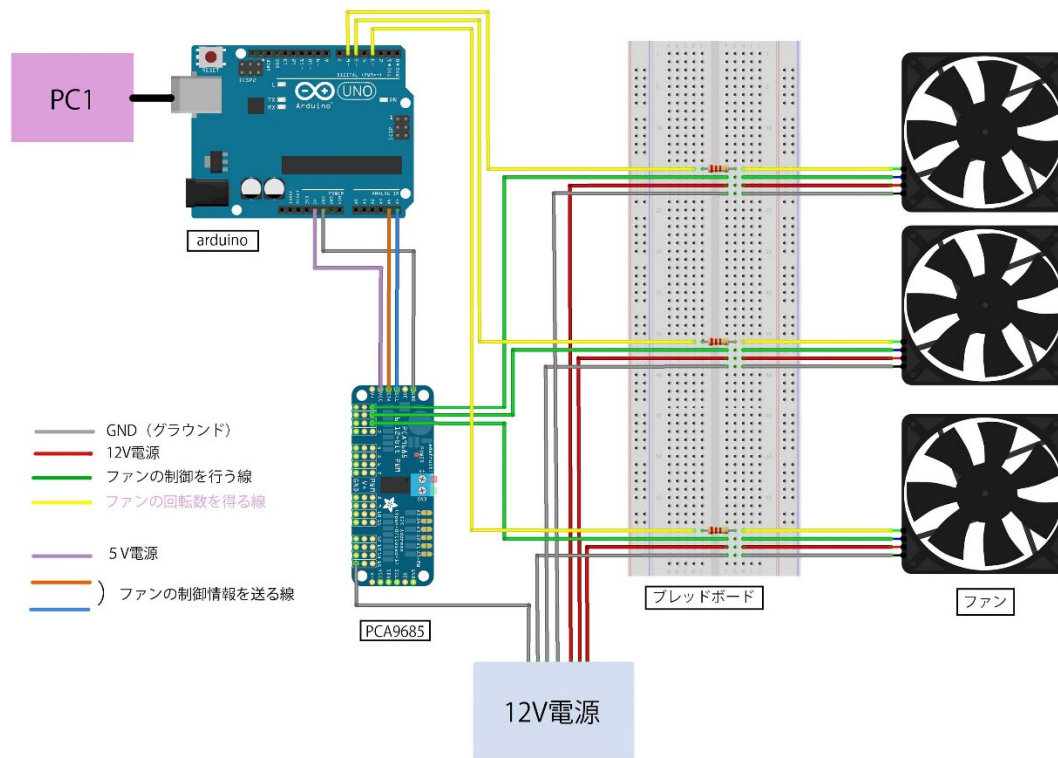


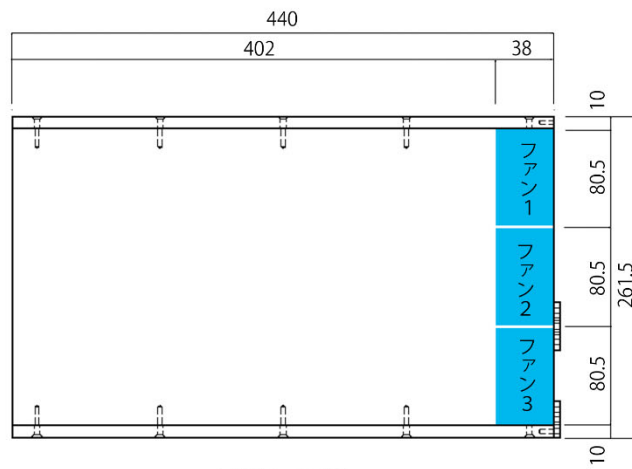
図 4 Arduino によるファン回転数制御の回路図

3.2 風洞実験によるファンの応答確認

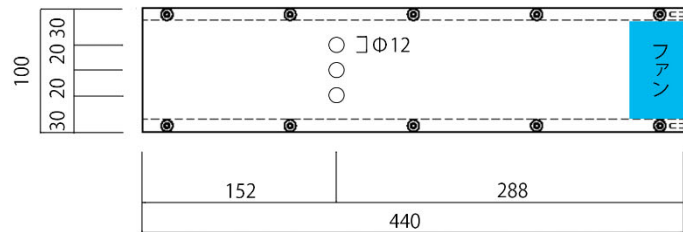
3.2.1 簡易風洞実験概要

本研究で制作したプログラムによる PWM 制御に対するファンの応答を確認するための一つの手段としてプログラム制御したファンが発生させる風の風速の観察が有効であると考えた。そこで、簡易的な風洞装置の製作をし、風速を測ることとした。図 5 に簡易風洞装置の概要を示す。

簡易型熱線流速計で風速を測定し、ファンへの入力電圧 duty 比、ファンの回転数、風速測定を比較して考察を行った。



風洞横断面(手前)図



風洞上面図

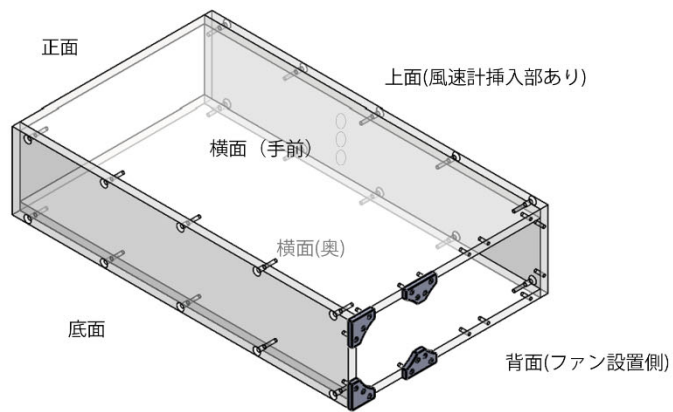


図 5 簡易風洞装置の概要

3.2.2 duty 比とファンの回転数の関係

図 6 に入力 duty 比とファンの回転数の平均値の関係を示す。3 つのファンの回転数は、仕様の通り、入力 duty 比に対して線形的に変化することを確認した。図 7 にファンに入力する duty 比を周期的に変動させた場合のファンの回転数変化を示す。ここでは、周期 10 秒で、平均値は duty 比 50%、変動幅は duty 比の $\pm 20\%$ の正弦波を与えた。入力 duty 比の増減は正弦曲線に従っているが、ファンの回転数は増加時と減少時で変化の性状が異なった。duty 比が一定時の回転数を同図に実線と点線で示す。入力 duty 比の最大値は 70%、最小値は 30%であるが、出力回転数は一定入力時とは、やや異なる値を示した。ファンの回転慣性や摩擦などの特性によって、これらの性状は異なると考えられる。

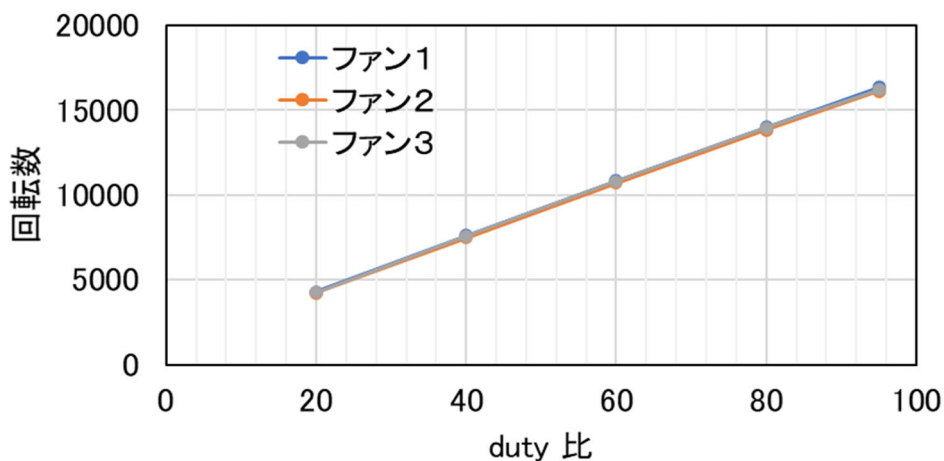


図 6 入力 duty 比とファンの回転数の関係

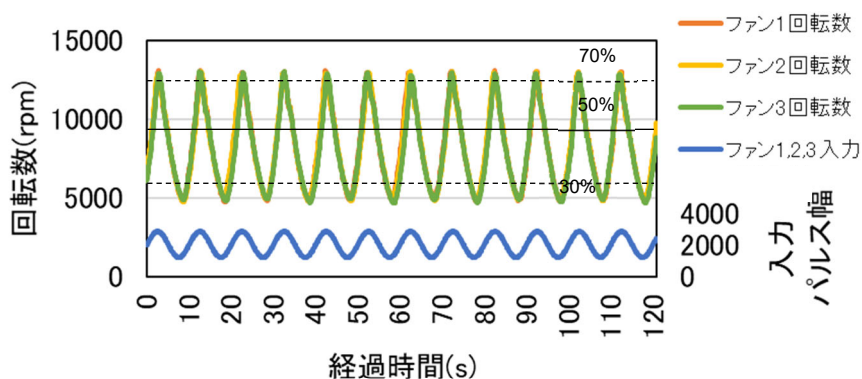


図 7 正弦波入力時のファン回転数の変化

4. ドームを構成する小型送風洞の作製と特性把握^{*2}

4.1 送風洞の試作(プロトタイプ 1)

ドームは二等辺三角形と正三角形の面で構成されるが、まず正三角形面に対して風を流入させる小型送風洞を製作した。使用したファンは山洋電機製で、12V 電源で駆動させた。寸法は 140mm×140mm×38mm 厚である。

使用したファンの形状から、送風洞の流入側は 140mm 四方の正方形で、流出側は一辺 168mm の正三角形となる。送風洞の正面断面形状および側面断面図を図 8 に示す。拡散洞で、正方形断面から円形断面へ変化させ、縮流洞では円形から三角形断面に変化させた。拡散洞の拡散角度および縮流洞の曲面形状は文献 2, 3)を参照して決定した。縮流洞の曲面形状は 6 次曲線で表現されるため、3D CAD で形状を作製し、3D プリンタで出力した。ここで用いた 3D プリンタは光造形タイプである。

整流位置は、拡散直後の円形断面（整流グリッド A）と縮流後の三角形断面（整流グリッド B）のいずれかとし、流出風の性状を実験で確認する。整流グリッドは、5mm 厚のラッシングボードを重ねて接着し、1 辺 4mm の正方形断面のグリッドを作成した。流路方向の長さは 30mm とした。図 9 に整流グリッドを示す。

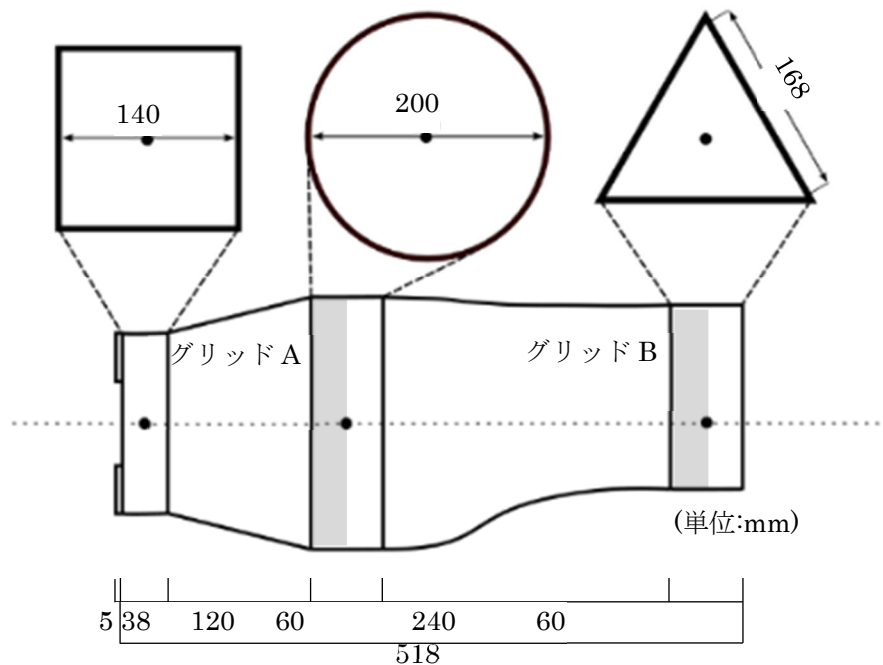
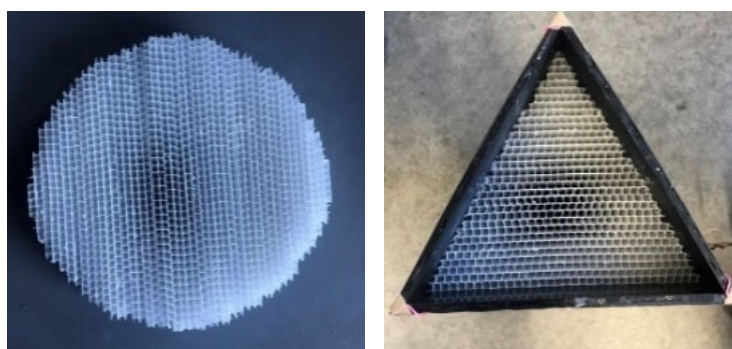


図 8 送風洞の正面断面と側面断面図

^{*2} 研究成果 2)および 4)に加筆，修正した。



整流グリッド A 整流グリッド B

図 9 整流グリッド

4.2 小型送風洞(プロトタイプ 1)の性状確認

4.2.1 実験方法

整流グリッド A と B をそれぞれ設置した状態で流出口位置での風速を測定する。ファンは平均電圧を制御する PWM 制御を行い、最大出力の 30%, 50%, 70% で実験を行った。計測サンプリングは 1Hz, 計測時間は 1 分間とし、同条件での計測を 3 回行った。断面内の測定位置は図 12 に示す。

4.2.2 実験結果

整流グリッド A および B それぞれの場合で、重心位置①での流出風速の時刻歴を図 10, 11 に示す。ファンの出力が同じであっても、整流グリッド A では整流グリッド B に比べて平均風速が大きく、風速変動は小さくなった。また、整流グリッド B の場合は 3 回の計測のばらつきが大きくなった。平均風速と乱れの強さの分布を図 12, 13 に示す。整流グリッド A の場合、辺に近い位置でやや風速が低く、頂点に近い位置でやや高い風速となるものの、平均風速はほとんど一様である。しかし、整流グリッド B では、断面中心での風速値が明らかに小さくなった。また、乱れの強さは、整流グリッド A ではすべての測定点で比較的小さな値となったが、整流グリッド B では断面内での乱れの強さのばらつきが大きく、特に風速値が低い中心で大きくなった。

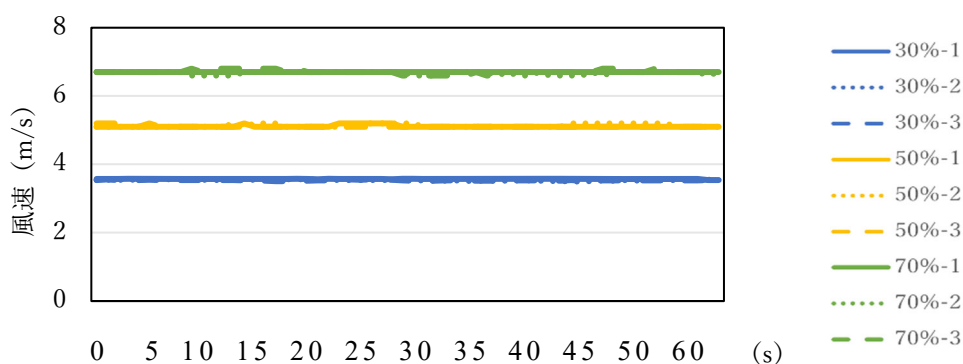


図 10 整流グリッド A-重心

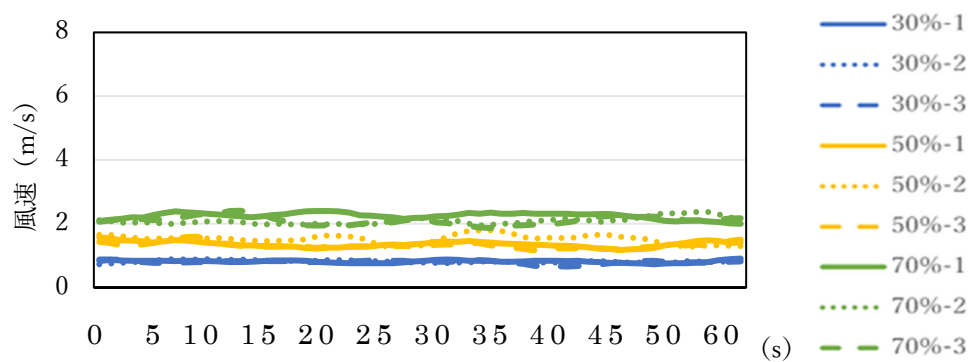


図 11 整流グリッド B-重心

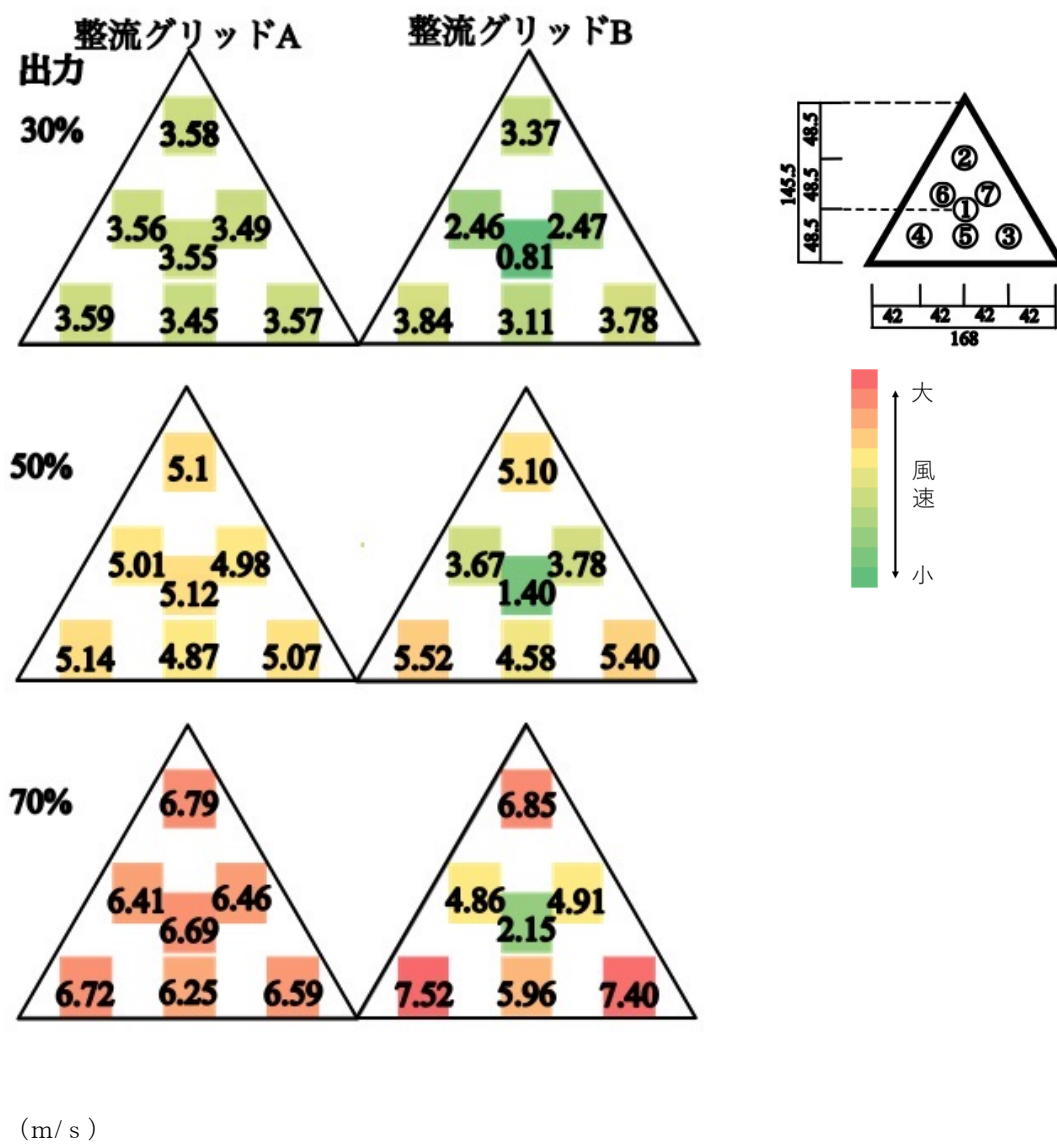


図 12 平均風速の分布

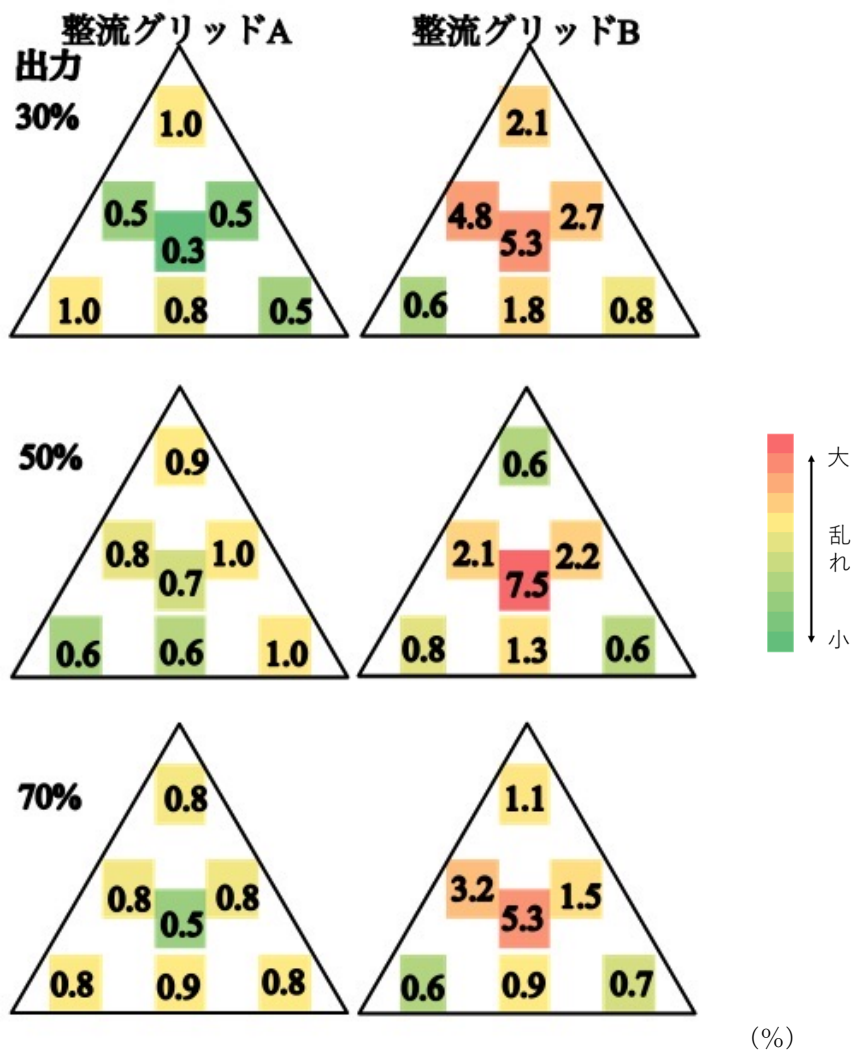


図 13 乱れの強さの分布

4.2.3. 実験結果のまとめ

本報では、ドーム型マルチファン風洞の送風洞部の縮流および整流の方法を検討し、報告した。拡散洞直後に整流グリッドを配置すると、三角形の流出断面位置での平均風速のばらつきは小さく、乱れの強さを比較的小さな値に抑えることができ、おおむね一様な風を吹かせることができた。しかし、風洞断面中央部での風速がやや低く、頂点付近で高い傾向が見られたため、整流方法の検討が必要である。

4.3 送風洞の試作(プロトタイプ 2)

プロトタイプ 1 で用いたファンは風量が多いものの重量が大きく，ドームに接合して固定するには工夫が必要であると判断し，異なる形状と素材の送風洞の製作を行った。本送風洞をプロトタイプ 2 とする。

使用したファンはプロトタイプ 1 と同様に三洋電機製で，寸法は $120\text{mm}\times 120\text{mm}\times 25\text{mm}$ 厚である。ファンの形状から，送風洞の流入側の内径は 121mm 四方の正方形で，流出側は一辺 135mm の正三角形，あるいは底辺 130mm ，斜辺 115mm の二等辺三角形となる。送風洞の正面断面形状および側面断面図を図 14 に示す。拡散洞で，正方形断面から円形断面へ変化させ，縮流洞では円形から三角形断面に変化させた。拡散洞の拡散角度および縮流洞の曲面形状は，プロトタイプ 1 と同様に文献 2,3) を参照して決定した。縮流洞の曲面形状は 6 次曲線で表現されるため，3D CAD で形状を作製し，3D プリンタで出力した。プロトタイプ 1 は光造形方式であったが，プロトタイプ 2 は積層方式の 3D プリンタを利用した。そのことによってファンだけでなく，送風洞全体が軽量化した。

整流には，拡散洞直後の円形断面にハニカムを挿入した。プロトタイプ 1 では，ラッシングボードを積層したグリッドを利用したが，プロトタイプ 2 はハニカムも 3D プリンタで造形した。ハニカムは対辺距離 7.79mm の正六角形断面で構成し，断面間距離は 0.87mm とした。流路方向の長さは 60mm である。図 15 にハニカムの構造と寸法を示す。

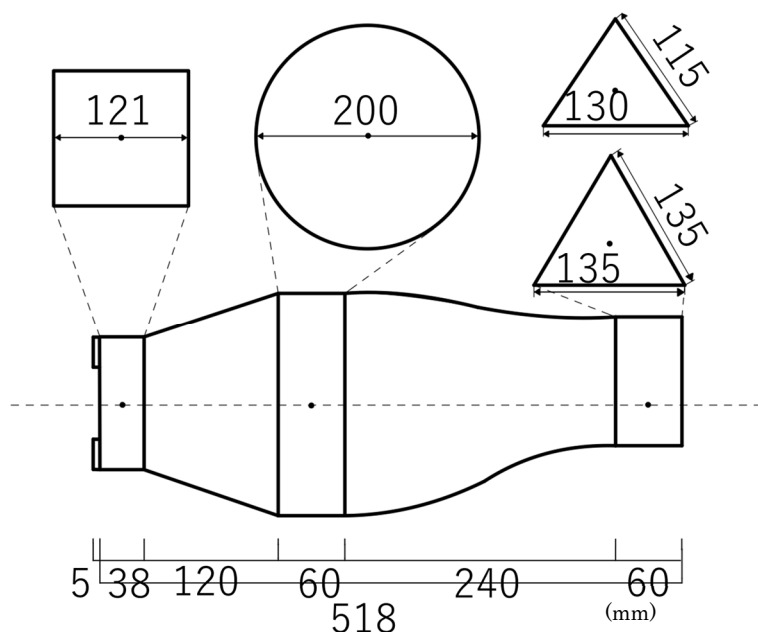


図 14 送風洞の正面と側面断面図

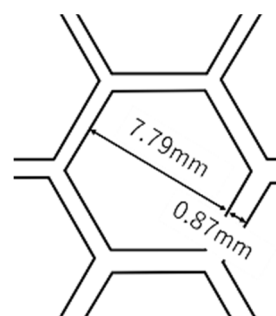


図 15 整流ハニカム寸法

4.4 小型送風洞(プロトタイプ 2)の性状確認実験

4.4.1 実験方法

送風洞の流出口位置での風速を測定した。送風洞は正三角形断面でハニカムなし (A) とハニカムあり (B), 二等辺三角形断面でハニカムあり (C) の 3 種類を用いた。ファンは 12V 電源で駆動させ, 平均電圧を制御する PWM 制御を行った。図 16 に実験の様子を示す。送風洞は横向きに設置し, 流出口から 1cm 位置で, 熱線風速計を用いて風速を計測した。送風洞の流出断面内での風況分布を把握するための定常流実験とファンの制御と風速の追従性を確認するための非定常流実験を行った。

定常流実験では, ファンの最大出力で風を吹き出した。断面内の計測位置は三角形の重心と, それぞれの頂点または辺との midpoint の 7 点とし, 計測位置は図 17 に示す。計測サンプリングは 100Hz, 計測時間は 1 分間とし, 同条件での計測を 3 回行った。非定常流実験では, ファンへの入力電圧の duty 比を正弦波で制御する。正弦波の平均値は duty 比 50%, 振幅は $\pm 25\%$ とする。正三角形断面でハニカムありの送風洞 B の重心位置での風速を計測した。入力電圧の正弦波の周期は 10 秒を基準に, それぞれ 1/2 になるよう変化させ, 5 秒, 2.5 秒, 1.25 秒, 0.625 秒, 0.3125 秒, 0.15625 秒の 7 つを用いた。

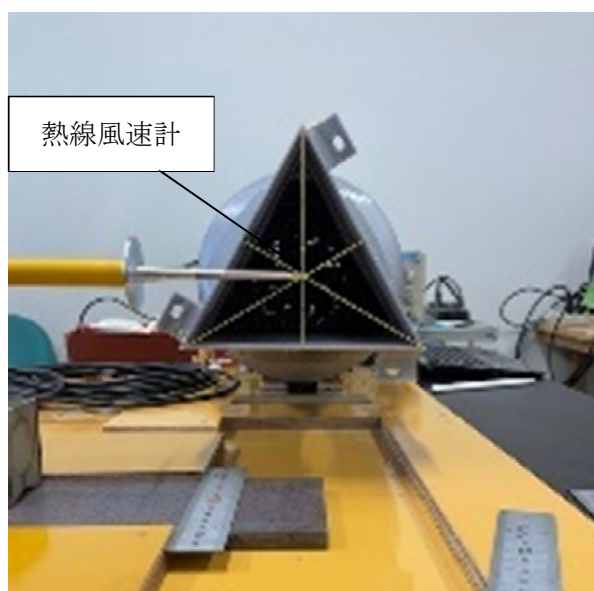


図 16 実験状況

4.4.2 実験結果

定常流実験による三角形断面内での平均風速と乱れの強さの分布を図 18 に示す。ハニカムなしの A よりハニカムありの送風洞 B, C の方が平均風速, 乱れの強さともに一様となった。しかし, 乱れの強さはやや大きい。

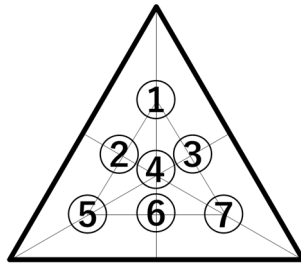


図 17 風速の計測位置

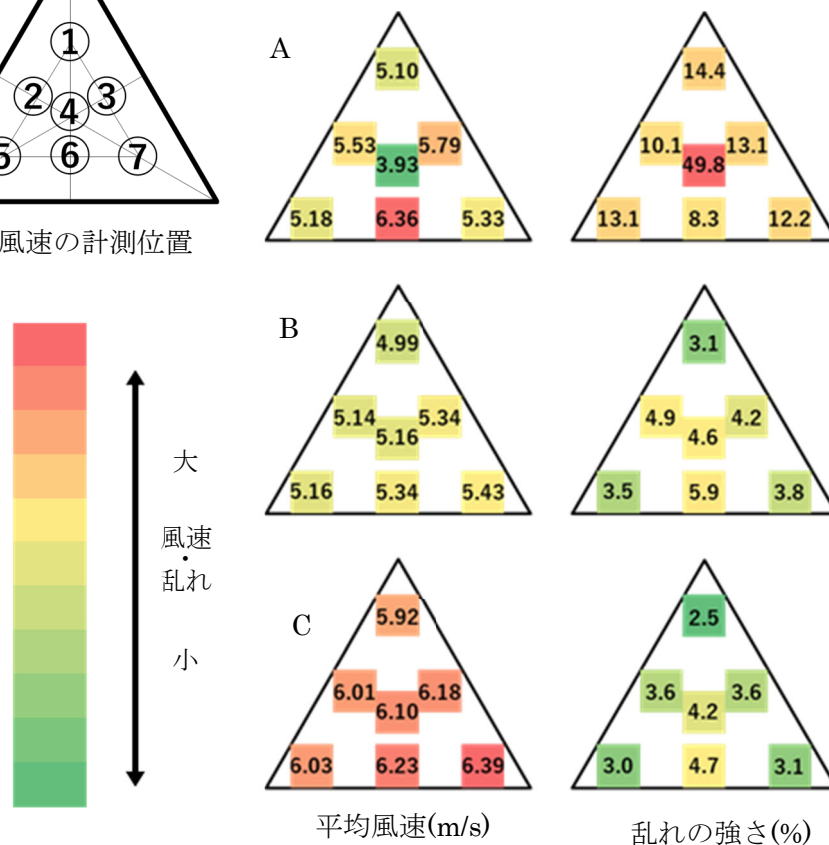
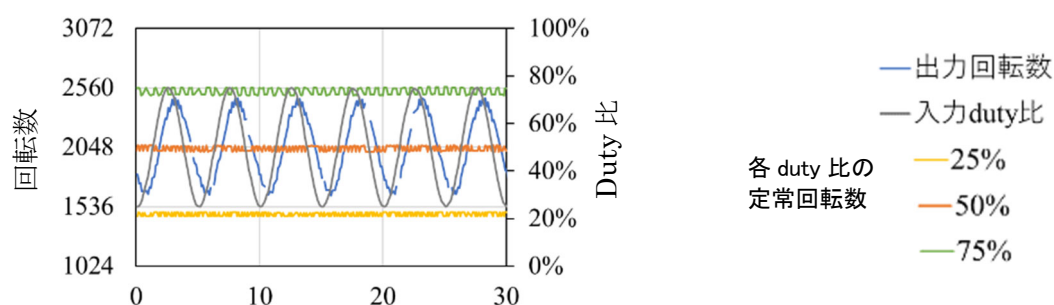


図 18 平均風速と乱れの強さの分布

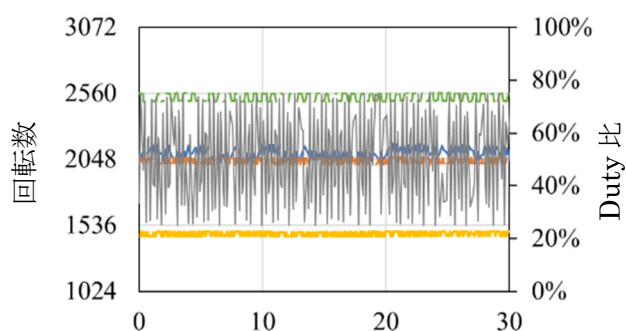
非定常流実験での入力信号の duty 比とファンの回転数との関係を図 19(a)と(b)に示す。比較のため, duty 比 25%, 50%, 75%の回転数の定常値をあわせて示した。ここでの入力値はファンからの出力回転数の読み取りと同時に入力した信号である。ファンからの信号読み取り時にノイズが多数混在し, 出力できなかった時刻の入力 duty 比が欠損しているため, 一部は正弦波形状を示さなかった。図 19(a)より周期 5 秒までは, 出力の回転数がやや上側に引っ張られ, 入力 duty 比に対して時間遅れがみられるが, 振幅は上下限共に定常値に近い値を示した。図 19(b)に示すように, 入力正弦波の周期が短くなるとファンの回転が入力

値の変化に追従できず、振幅が小さくなった。また、入力周期 5 秒と 0.3125 秒での風速時刻歴波形を図 20 に示す。ただし、図 20 の風速と図 19 のファンの出力信号は同時刻に取得されたものではない。風速値の変動はおおむねファンの回転数に対応しているように見える。

図 21(a)と(b)に流出面での風速変動をフーリエスペクトルで評価した。入力電圧の周期が大きいものは短いものに比べて振幅のピーク値が顕著に表れた。また、短い入力周期では入力の正弦波周期とは異なる値で振幅のピークがみられた。



(a) 入力周期 5 秒の正弦波の場合



(b) 入力周期 0.3125 秒の正弦波の場合

図 19 入力 duty 比とファンの回転数との関係

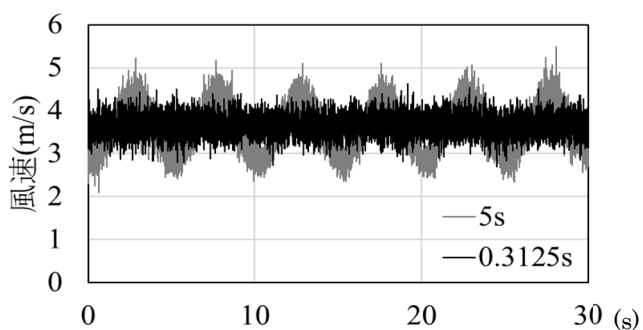


図 20 風速の時刻歴波形

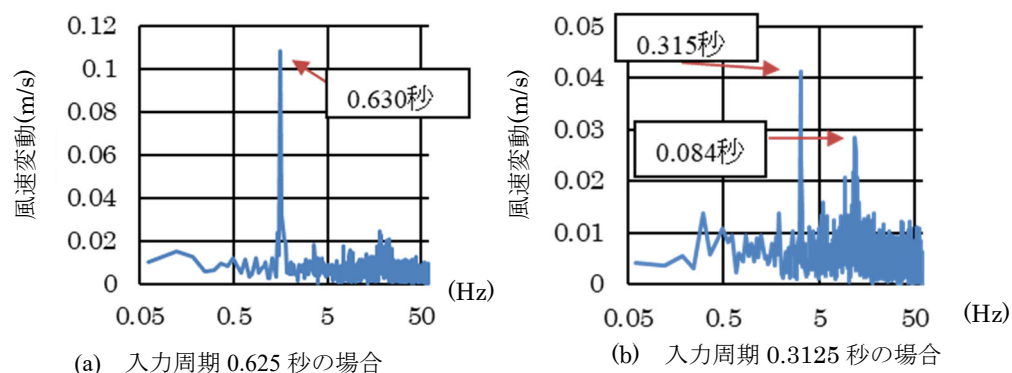


図 21 風速変動のフーリエスペクトル

4.4.3 実験のまとめ

本報では、ドーム型マルチファン風洞の小型送風洞（プロトタイプ 2）の風性状を報告した。拡散洞直後にハニカムを配置すると、三角形の流出断面位置での平均風速のばらつきは小さく、乱れの強さは小さく制御することができ、おおむね一様な風を吹かせることができた。また、入力電圧の変動周期が短くなるとファン回転数の振幅が入力値の追従できなくなり、目標となる風速変動を十分に再現できなかった。ファンの制御手法を引き続き検討する必要がある。

5. 数値流体計算によるドーム型風洞内の風況制御方法の検討^{*3}

5.1 数値流体解析の目的

現行の耐風設計は、風向別の水平風が作用するときの風荷重に基づいて行われている。しかし、実際の台風などの自然強風下においては、強い乱れを持ち風向風速が時々刻々と変化することが指摘されている¹⁾。台風強風下での複雑な風況を再現し、住家被害の拡大メカニズムをより实际的に分析することを目的として、著者らの研究グループでは、マルチファン制御によるドーム風洞の開発に取り組んでいる⁴⁾。ドーム風洞は三角形と四角形で構成される仮想的な半球状ドームの各面にファン付きの送風洞を取り付け、3 次元的に時々刻々と変化する風況の再現を目指すものである。ドーム風洞内のある地点での風速の時刻歴波形を再現波形に対応させるためには、ドームの各流入面での流入風の条件を明らかにする必要がある。

本研究では、数値流体計算を用いて、ドーム風洞内の風況制御方法を検討した。ドーム風洞での最終的な目標は 3 成分の風速波形を制御することであるが、本研究では、まず水平 2 成分の風速波形を制御することを目標とした。

^{*3} 研究成果 3)を修正した。

5.2 解析概要

解析モデルを図 22 に示す。ドーム風洞は半径 300mm の半球型であり、その球面上の約半分を流入面として利用し、残り半分は流出面として利用する。解析においては、流出面の外側の領域も合わせた解析を行うこととし、ドーム風洞の後部は、1200mm×1200mm×600mm の箱型とし、箱の上面、側面、背面を流出面とした。また水平風の制御の簡略化を考慮し、本解析では、半球型のドームの鉛直下側に四角形の鉛直壁を設け、図 22 中の i1～i5 の面を流入面とした。残りの面は、slip 型の壁面境界として設定した。解析は汎用数値流体解析ソフト OpenFOAM v2112 を用いて実施した。流体は、非圧縮性流体とし、ソルバーとして pisoFoam を使用した。乱流モデルは LES モデルを使用した。解析領域のメッシュはテトラメッシュとし、ドーム内及びその周辺のセルサイズは約 30mm とした。解析の時間刻みは 0.0001 秒である。

風速の再現対象点は、ドーム中央で高さ 50mm の位置とした。再現目標風速は、丸山らが舞洲で観測した風速波形¹⁾のうちの、ある 200 秒間の水平 2 成分とした。解析領域の長さスケールは実際の 1/50 であり、風速尺度は 1/5、時間尺度は 1/10 とした。また、ドーム風洞ではファンの回転数制御で風の乱れを再現するため、高い周波数の乱れは再現できないことが想定される。そこで、2Hz のローパスフィルターを掛けて、2Hz 以下の周波数成分を再現対象とした。このように作成した 20 秒間の波形を目標風速とした。

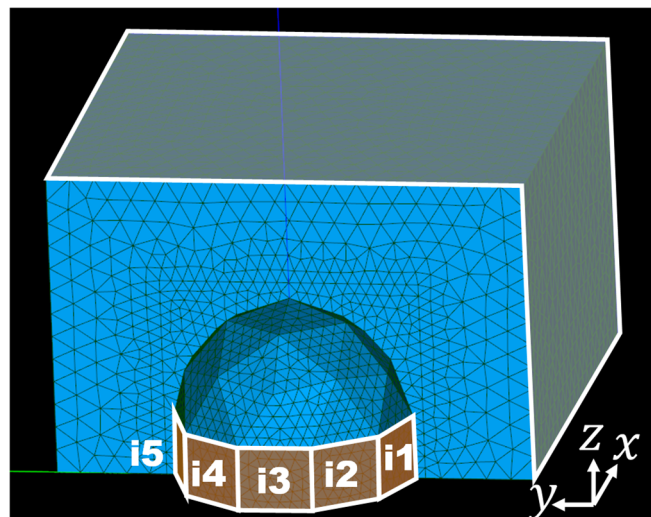


図 22 解析モデル

5.3 風速制御手法

入力風速から出力風速を得るまでの解析システムの概要を図 23 に示す。本解析では、入力風速を設定し、それを 5 つ流入面の流入風速に変換し、解析を実行して、再現対象点での風速（出力風速）を得る。入力風速と流入風速の関係については、事前に、i1~i5 に様々な定常風を与えた解析結果より得られた関係を用いた。入力風速 $f(t)$ を与え、出力風速 $g(t)$ を得るまでを一つのシステムとして捉えると、フーリエ変換した入力風速 $F(n)$ と出力風速 $G(n)$ は伝達関数 $H(n)$ を用いて次のように表すことができる。

$$G(n) = H(n) \cdot F(n) \quad (1)$$

ただし、 $H(n)$ は入力風速によって値が変化する。目標風速を完全に再現した時の出力風速を $g_t(t)$ 、その時の入力風速を $f_t(t)$ とし、それぞれのフーリエ変換を G_t, F_t （以下、同様の表記）とすると、次のように表される。

$$G_t(n) = H_t(n) \cdot F_t(n) \quad (2)$$

上記の関係から $f_t(t)$ を求めることは困難であるため、本解析では下記のプロセスのように、誤差を小さくする反復計算を行い、近似的に求めた。

反復回数が i 回目の時、風速波形 $f_i(t)$ を入力し、出力波形 $g_i(t)$ を得る解析は次のように表せる。

$$G_i(n) = H_i(n) \cdot F_i(n) \quad (3)$$

この出力風速と目標風速の差を時刻歴で求めると、

$$\Delta g_i(t) = g_t(t) - g_i(t) \quad (4)$$

この差分 $\Delta g_i(t)$ のフーリエ変換 $\Delta G_i(n)$ を求める。伝達関数を求めれば、次式のように入力風速の補正值が得られる。なお、伝達関数は 2 つの解析の入力風速と出力風速を用いることで求められる。

$$\Delta F_i(n) = H_i(n)^{-1} \Delta G_i(n) \quad (5)$$

$\Delta F_i(n)$ を逆フーリエ変換し、補正波形 $\Delta f_i(t)$ を得る。これを入力風速に加え、次の解析の入力風速とする。ただし、収束の安定性を考慮して、低減係数 γ （本解析では 0.5 を用いた）を乗じて加える。

$$f_{i+1}(t) = f_i(t) + \gamma \Delta f_i(t) \quad (6)$$

式(3)から(6)のプロセスを繰り返すことで、 $g_i(t)$ を $g_t(t)$ に近づける。

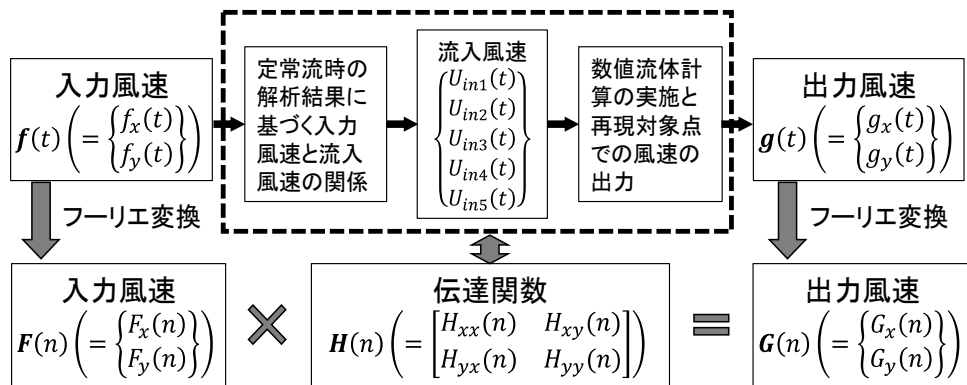


図 23 解析システムの概要

5.4 風速制御手法の検証結果

上記の手法により、再現対象点の風速が目標風速に近づくよう解析を繰り返した。なお、最初の解析においては目標風速を入力風速として用いた。図 24 に最初の解析(反復 0 回目)の出力風速と、反復を 3 回繰り返した後の出力風速の目標風速との比較を示す。図中に出力風速と目標風速の誤差の代表値として二乗平均平方根誤差 (RMSE) を記している。最初の解析では、x 成分は少し位相がずれており、y 成分は風速変動を精度良く再現できていない。一方、反復 3 回後は、x、y 成分共に目標風速に近づいていることが確認できる。図 25 は反復回数と RMSE の関係を示す。反復回数が増えるごとに、誤差が小さくなることが確認できる。

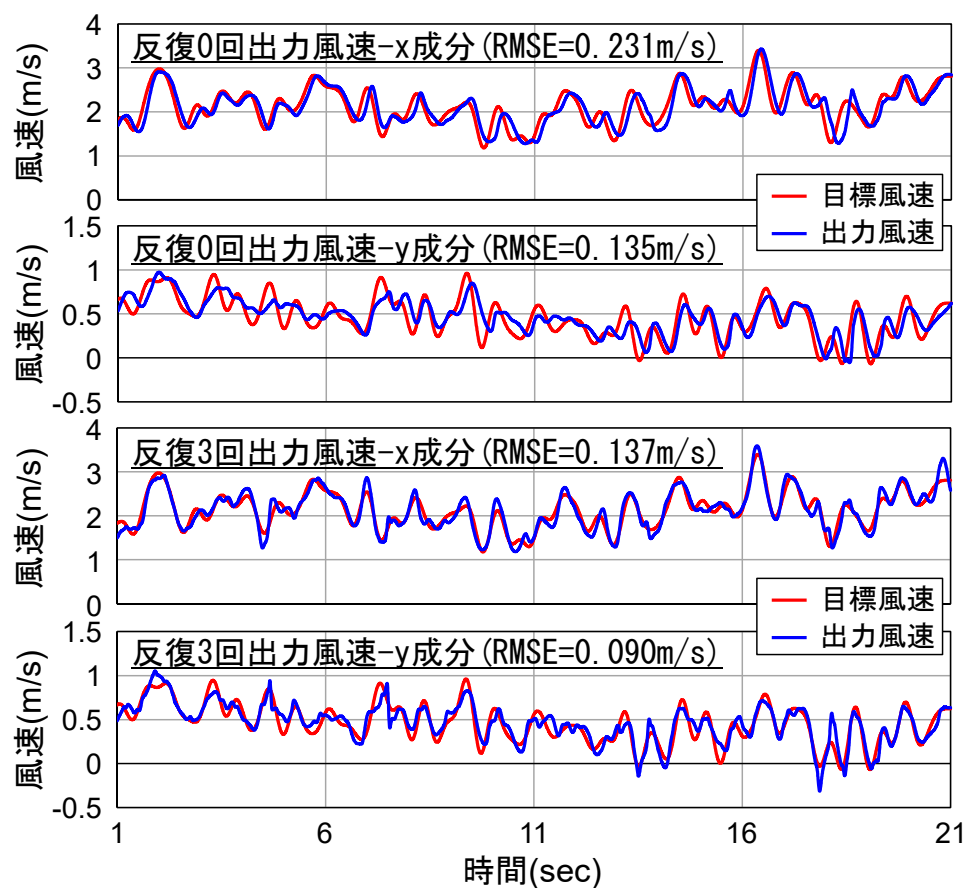


図 24 出力風速と目標風速の比較

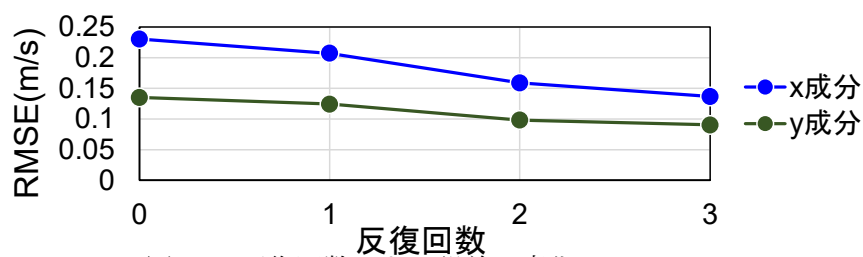


図 25 反復回数による誤差の変化

5.5 数値解析のまとめ

ドーム風洞内の風況の制御手法として、伝達関数を用い、反復計算することで、出力風速を目標風速に近づける方法を考案し、数値流体計算によりその手法を検証した。今回の検証例では反復回数を増やすことで、誤差が小さくなることを示した。今後、検証例を増やし、本手法の妥当性を確認するとともに、効率的に誤差を収束させる方法を検討していく。

6. まとめ

本研究ではドームに複数のファンを立体配置した風洞装置を試作し、風向風速が 3 次元的に時々刻々と変化する台風の自然強風下での、地上付近の複雑な風況の再現を目指して、ファンの制御方法の確立、小型送風洞の製作およびドーム内風況制御のための小型送風洞の風速設定の数値流体解析による検討を行った。

①ファンの制御方法の確立

複数のファンの回転数を同時に独立して制御するプログラムを作成し、回転数の制御が可能となった。ファンの回転数の変動と出力風速の変動とには差異が生じ、ファンの応答性等を踏まえて、入力 duty 値と出力風速との関係を検討する必要がある。

②小型送風洞の製作

ドーム型マルチファン風洞に接合する小型送風洞を 3D プリンタで製作し、風況を計測した。拡散洞直後にハニカムを配置すると、三角形の流出断面位置での平均風速のばらつきは小さく、乱れの強さは小さく制御することができ、おおむね一様な風を吹かせることができた。また、入力電圧の変動周期が短くなるとファン回転数の振幅が入力値の追従できなくなり、目標となる風速変動を十分に再現できないことが分かった。目標風速を生成するためのファンの制御手法を引き続き検討する必要がある。

③数値流体解析によるドーム風洞内の風況の制御手法の検討

伝達関数を用い、反復計算することで、出力風速を目標風速に近づける方法を考案し、数値流体計算を用いてその手法を検証した。検証例では反復回数を増やすことで、誤差が小さくなることを示した。今後、検証例を増やし、本手法の妥当性を確認するとともに、効率的に誤差を収束させる方法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 丸山ら：接地境界層中に置かれた 2.4m 立方体周りの気流・風圧性状，日本風工学会論文集，No.99，pp227-240, 2004.
- 2) 伊藤ら：低乱風洞の設計方法，ターボ機械第 9 巻第 4 号，pp.211-218, 1981.4.
- 3) 西沢ら：低速風洞縮流胴における境界層遷移過程，独立行政法人航空宇宙技術研究所報告，TR-1462，2003.6.
- 4) 友清ら：3 次元風況を再現するドーム風洞のためのマルチファンの制御と設置方法の検討，令和 3 年度京都大学防災研究所研究発表講演会，C124，2022.