

# 複数ファン制御乱流風洞の高性能化研究

(22360222)

平成22～25年度科学研究費補助金(基盤研究(B))研究成果報告書

平成25年3月

研究代表者 神田 順

(日本大学理工学部建築学科特任教授)

# 目次

## 研究概要

### 第一章 研究目的と背景

1 . 1	研究開始当初の背景	2
1 . 2	研究目的	2
1 . 3	研究方法	2

### 第二章 試作風洞の概要と気流性状

2 . 1	風洞施設の概要	6
2 . 2	3列複数ファン風洞の基本的特性	12

### 第三章 スペクトル特性とココヒーレンスを模擬した気流の作成

3 . 1	制御周波数に関する検討	26
3 . 2	スペクトル特性を模擬した気流の作成	28
3 . 3	ココヒーレンス特性を模擬した気流の作成	30

### 第四章 非定常な風向変動の気流の作成

4 . 1	作成目標とする気流性状と実験要件	37
4 . 2	上下端のファンに対する入力値の調整	39
4 . 3	中央4段のファンに対する入力値の調整	45
4 . 4	非定常風向変化気流の作成	58

### 第五章 風洞内静圧分布の測定実験

5 . 1	静圧測定手法	69
5 . 2	風速変化時における風洞内静圧分布	71
5 . 3	風向変化時における風洞内静圧分布	90

## 第六章 非定常気流下における基本断面の風圧測定実験

6 . 1	竜巻状風模擬気流の作成	100
6 . 2	模型周辺での気流分布の把握	119
6 . 3	圧力測定の概要	121
6 . 4	円柱、角柱における基本断面の風圧測定実験結果	127

## 第七章 結論

7 . 1	結論	134
7 . 2	今後の展望	136

参考文献	137
------	-----

## 研究概要

## 1. 研究目的

境界層乱流風洞は 1 つの大きな送風機によって作られた風を風路内に設けたメッシュ、スパイヤー、ソウ、ラフネスブロック等により、平均風速や乱れの強さの鉛直分布を自然風と同じ様に調整する事で、実際に計測された風速変動をモデル化したスペクトル特性を有する定常な自然風を模擬できる風洞として、今日の耐風設計又は建築環境設計分野に大きく貢献をしてきた。しかしながら、この境界層乱流風洞は定常気流を再現するもので、非定常気流や風向変動を再現することはできない。遂に風荷重への影響については具体的に風洞実験により検討した研究例は極めて少ない。

他方で、風洞自体を従来のような 1 つの大きな送風機と様々な装置を用いて実験を行うパッシブ型ではなく、1 つの風洞内にコンピューターで個々の数値制御が可能な小型送風機を多数設置したアクティブ型風洞の実験的研究も行われている。この先駆的なアクティブ制御型のマルチファン型風洞により、実測された流速の瞬間波形を風洞内に作りだすことに成功している。しかし、それらの研究は自然風の模擬に関する研究が主であり、風向変動が建物にどのような影響を及ぼすかについてまでは検討されていない。

## 2. 研究概要

以下に研究組織、研究経費および研究経過をまとめて示す。

### (1) 研究組織

日本大学理工学部建築学科特任教授	神田 順(代表)
	2010年4月～2013年3月
(株) 荏原製作所エンジニアリング事業本部風水力事業統括プロジェクト設計第5部担当部長	結城邦之(分担)
	2010年4月～2013年3月
(株) 風技術センター社長	吉田正昭(アドバイザー)
	2010年4月～2013年3月
淡江大学工学研究科土木工学部助教授	羅 元隆(補助)
	2012年4月～2012年6月

### (2) 研究経費

平成22年度	千円
平成23年度	千円
平成24年度	千円

### (3) 研究経過

本研究では、1列6個であった複数ファン風洞を3列18個に拡大することで、実際にどのような気流を作成出来るのか、そのファン回転数と風速変化、周波数範囲と風速表現、風向変化角度と風向変化時間、測定洞内の風速・風向分布、乱流的な風速のスペクトル特性とココヒーレンス性状の把握を行うこと。さらに、従来の境界層風洞とは違って、非定常で長周期な風向変動のような気流を作成し、その非定常な気流が建物の風圧特性にどのような影響を及ぼすのかを研究すること。そして、竜巻を想定した風速や風向の変化を伴う非定常風の作成と、作成した気流が基本断面へ与える非定常作用を把握すること。

## 3. 研究実績

- 1) 寺井亮、神田順：複数ファン風洞による非定常な風向変動が2次元角柱の風圧特性に与える影響に関する研究-その3円柱と角柱の風圧特性と気流の最適化、日本建築学会2010年度大会(北陸)。
- 2) 寺井亮、神田順：風向変化を考慮した風の建築物に対する非定常作用に関する基礎的研究、日本建築学会2011年度大会(関東)。
- 3) 帯刀良之、神田順：日本における建築設計用仮想竜巻モデルの提案、2010年度日本建築学会関東支部研究発表会。
- 4) 帯刀良之、神田順：被害分布と強風域との整合性を考慮した建築設計用仮想竜巻モデルの提案、日本建築学会2011年度大会(関東)。
- 5) Ryo Terai, Jun Kanda: Non-stationary Wind Direction Simulation in Wind Tunnel with Computer-controlled Multiple Fans, ICWE13, Amsterdam.
- 6) Yoshiyuki Tatewaki, Jun Kanda, Hitomisu Kikitsu, Yuan-Lung Lo: Wind Pressure Characteristics of Square Prism under Non-stationary Wind in Multiple Fan Wind Tunnel, BBAA7, Shanghai.

## 第一章

### 序論

## 1. 1 研究開始当初の背景

境界層乱流風洞は 1 つの大きな送風機によって作られた風を風路内に設けたメッシュ、スパイヤー、ソウ、ラフネスブロック等により、平均風速や乱れの強さの鉛直分布を自然風と同じ様に調整する事で、実際に計測された風速変動をモデル化したスペクトル特性を有する定常な自然風を模擬できる風洞として、今日の耐風設計又は建築環境設計分野に大きく貢献をしてきた。しかしながら、この境界層乱流風洞は定常気流を再現するもので、非定常気流や風向変動を再現することはできない。遂に風荷重への影響については具体的に風洞実験により検討した研究例は極めて少ない。他方で、風洞自体を従来のような 1 つの大きな送風機と様々な装置を用いて実験を行うパッシブ型ではなく、1 つの風洞内にコンピューターで個々の数値制御が可能な小型送風機を多数設置したアクティブ型風洞の実験的研究も行われている。この先駆的なアクティブ制御型のマルチファン型風洞により、実測された流速の瞬間波形を風洞内に作り出すことに成功している。しかし、それらの研究は自然風の模擬に関する研究が主であり、風向変動が建物にどのような影響を及ぼすかについては検討されていない。

## 1. 2 研究目的

- (1) 本研究では、1 列 6 個であった複数ファン風洞を 3 列 18 個に拡大することで、実際にどのような気流を作成出来るのか、そのファン回転数と風速変化、周波数範囲と風速表現、風向変化角度と風向変化時間、測定洞内の風速・風向分布、乱流的な風速のスペクトル特性とココヒーレンス性状の把握を行うこと。
- (2) 従来の境界層風洞とは違って、非定常で長周期な風向変動のような気流を作成し、その非定常な気流が建物の風圧特性にどのような影響を及ぼすのかを研究すること。
- (3) 竜巻を想定した風速や風向の変化を伴う非定常風の作成と、作成した気流が基本断面へ与える非定常作用を把握すること。

## 1. 3 研究目的

(1) 従来の研究成果で検討した 1 列複数ファン制御の再検討及び、3 列複数ファン風洞の概要と風洞内の気流の基本性状を示し、各ファンの回転数を任意に変化させた際の平均風速分布への影響を把握する。把握すべき基本性状として既往の研究成果を踏まえて、2 点が挙げられる。

- ①、任意の回転数と平均風速分布の関係
- ②、周波数帯域毎の変動風速の測定



乱流的な風速について、風洞内の変動風速のパワースペクトルの目標値をカルマン型パワースペクトルと設定する事で、ココヒーレンスの目標値を建築物荷重指針に則った指数関数式で定める。測定値と目標値との対比に基づいて入力値の修正を行い、入力時刻歴を変化させるフィードバック制御を行う。具体的には、各ファンに同じデータを入力し、測定位置毎に測定値が目標値に収束した際の入力値を、ココヒーレンスの制御も考慮に入れながら、再び各ファンに入力する。これを繰り返す事で、測定値と目標値との差に基づいてフィードバック制御を行う。

(2) 具体的には、小型ファンをコンピューター上で独立に制御することで、小型ファン同士が生み出す気流の関係をケーススタディし、風洞内に発生する非定常な風向変動をう明確に把握する。また、気流の可視化実験を通して各ファンが生み出す気流性状を確認し、非定常な風向変動を検証する。さらに、基礎的な風圧模型を用いた、数秒程度から数十秒程度のゆっくりとした非定常な風向変動が建物風圧特性に与える影響について、従来の境界層風洞で行われてきた風圧実験を比較する事で、その影響について検討する。

(3) 気象庁で公開している『竜巻等の突風データベース』および既往の理論式より算出した風速・風向の短時間の変化を複数ファン風洞で模擬するし、風圧の測定も行う。パラメータとして風圧模型の設置角度も変化させることで、竜巻の構造物に対する進入角度すなわち、竜巻との位置関係と非定常作用の程度をある程度対応した評価を行う。



## 第二章

### 試作風洞の概要と気流性状

## 2. 1 風洞施設の概要

### 2. 1. 1 3列複数ファン風洞

3列複数ファン風洞は、1列複数ファン風洞を改修する形で2010年7月に東京大学柏キャンパス新領域環境棟1Fの風洞実験室に設置された（図2.1）。

本風洞は、上流端に6行3列の計18個の小型ファンが並んだ、全長6000mmの吹き出し式風洞である。上流端のファンから測定胴へは鉛直方向に5/9の断面比で縮流され、各ファンの後ろには気流のねじれを防ぐためのストロー状の整流格子が挿入してある。測定胴は、長さ3600mm×幅600mm×高さ600mmであり、以下、図2.2のように風洞上流端を原点としたxyzの3次元座標系によって位置を表すこととする。風洞上部から取り付けられたトラバースによって、 $x=0\text{mm}\sim 3400\text{mm}$ 、 $y=60\text{mm}\sim 540\text{mm}$ 、 $z=30\text{mm}\sim 570\text{mm}$ の範囲で任意の位置で風速を測定することができる。また、気流の可視化実験にも対応できるように、縮流胴と測定胴の片面はアクリル板とガラス板が用いられている。図2.3に風洞の外観を、図2.4に風洞上部のトラバースを示す。また、図2.5に風洞の詳細図面を示す。

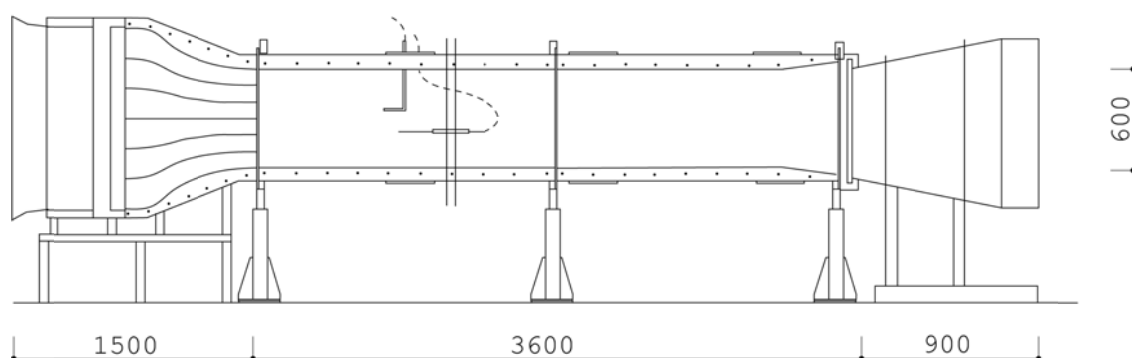


図 2.1 風洞概要

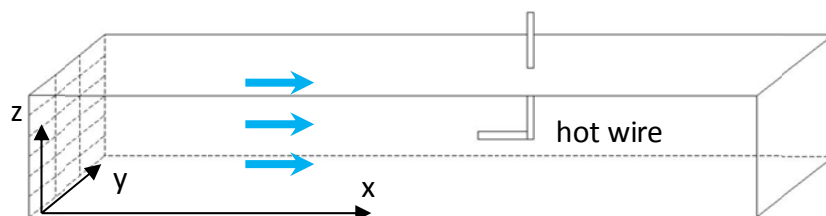


図 2.2 座標設定



図 2.3 3列複数ファン風洞外観



図 2.4 風洞上部の様子

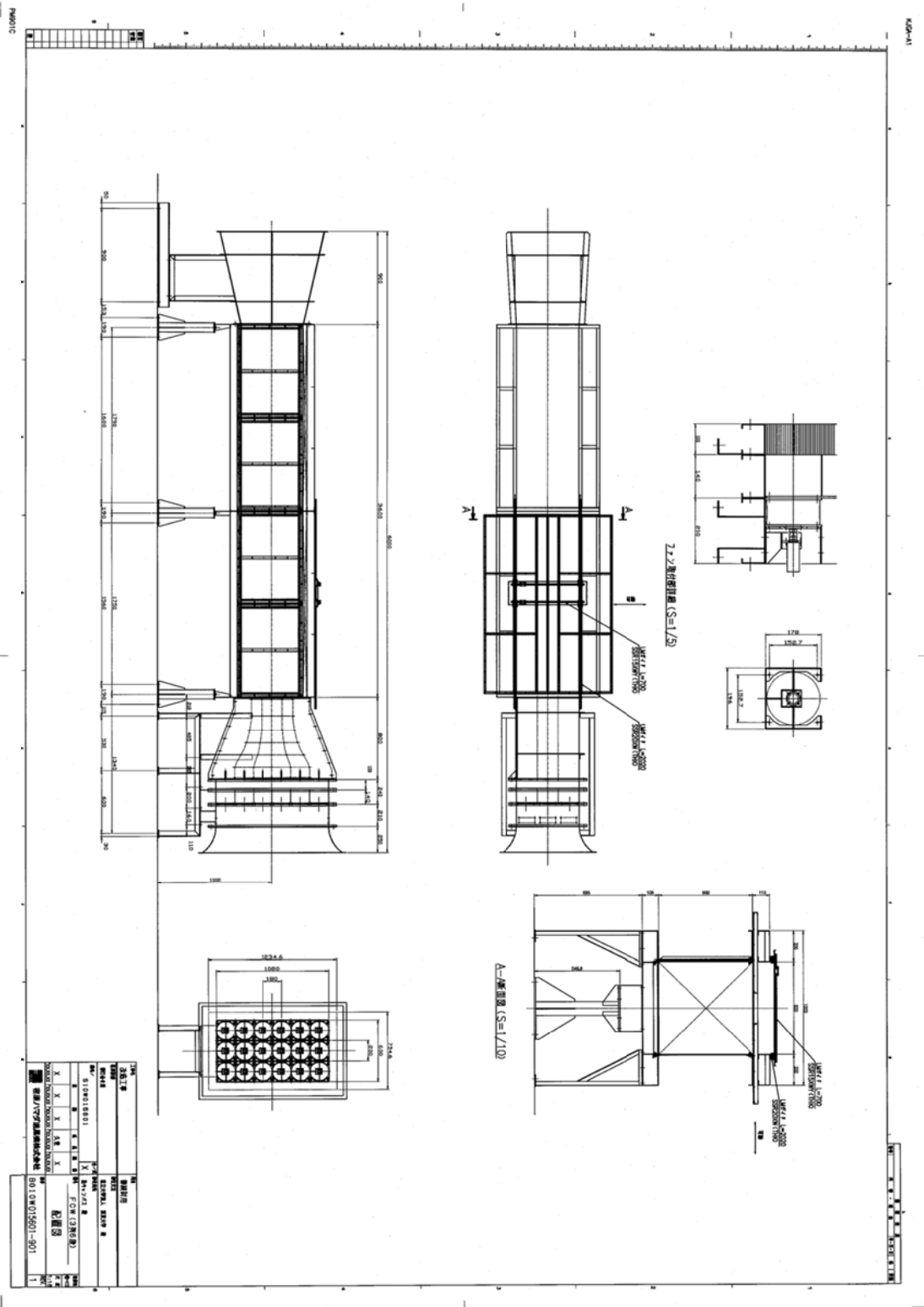


図 2.5 3 列複数ファン風洞図面

本風洞の18個のファンの写真を図2.6に示す。ファンの並びは上から順番に1段目、2段目、…、6段目、また、y方向に小さいものから順番に1列目、2列目、3列目とし、それぞれa段b列のファンをch(a, b)と呼ぶことにする。

各ファンの駆動に用いたACサーボモータとファンの諸性能を表2.1に示す。これらの機器は1列複数ファン風洞から流用したものと、新しく追加したものとで混成されている。ファンの回転数は0~3000r/minの範囲で、各ファンについて独立に制御することができる。

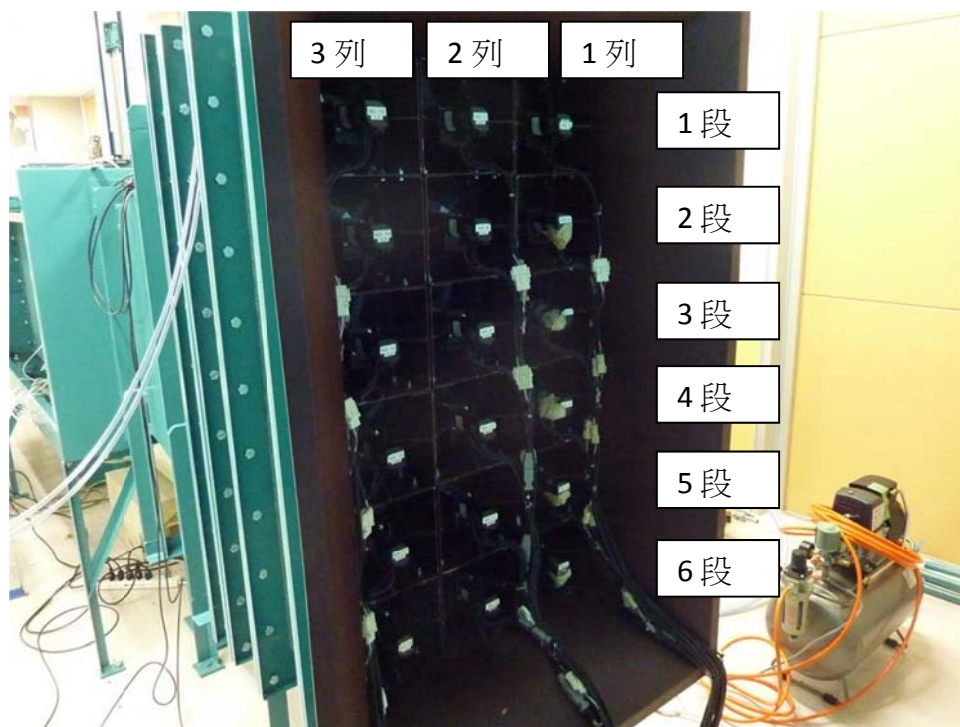


図 2.6 ファンの様子

表 2.1 ACサーボモータとファンの諸性能

ファン	
形式	2段羽タイプ
直径	180mm
最大風量	11.2m <sup>3</sup> /mm
最大静圧	28.0mmAq
騒音	65db

ACサーボモータ	
定格出力	100W
定格トルク	0.318Nm
瞬間最大トルク	0.960Nm
トルク定数	0.156Nm/A
定格回転速度	3000r/min
最高回転速度	4500r/min
機械的時定数	0.6ms
電氣的時定数	1.6ms

## 2. 1. 2 測定制御システム

ファンの制御は制御用のコンピュータ上のプログラム（図 2.7）を用いることで行われる。このプログラムでは、事前に作成した csv ファイルを読み込むことで、それぞれのファンについて、各時点におけるファンの回転数を任意に設定することが可能である。csv ファイルは-1~1 の数値によって構成され、その数値にプログラム上で与える数値  $V/t_0$  を掛け合わせることで、それぞれのファンに対する入力電圧が決定される。ファンの回転数の 0~5000r/min に対して、プログラム上の入力電圧 0~10v が対応し、かつ逆回転をさせることも可能となっている。ただし、実際のサーボモータの定格は 3000r/min であり、安定性の保証された実験は 0~6v の入力の時に行えるといえる。

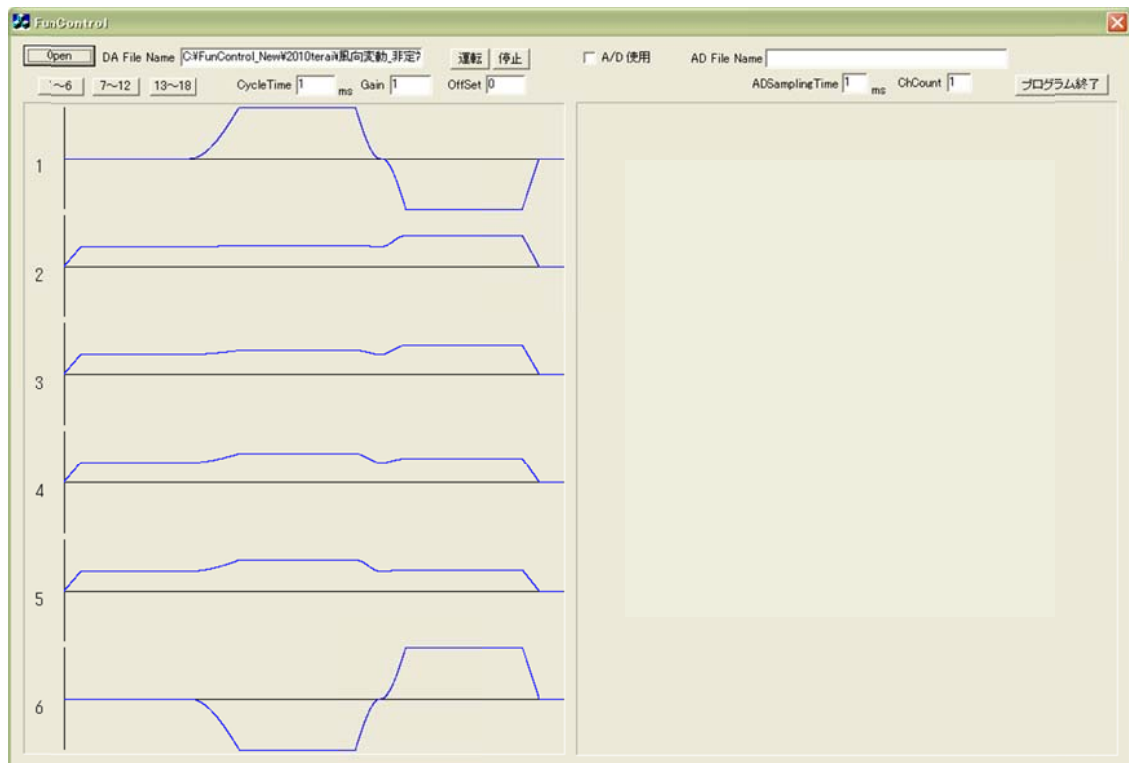


図 2.7 複数ファン制御プログラム



### 2. 1. 3 風速測定方法

風速の測定は図 2.8 のように機器を設置して行う。各測定機器の詳細を表 2.2 に示す。本研究では風速を 2 次元的、あるいは 3 次元的に計測する必要がある。そのため、風速の測定を行う際には、ファン制御用のコンピュータの他に、もう一台のコンピュータを用意し、それに x 型プローブに対応した熱線風速計を接続することで風速を測定する。この際、x 型熱線風速計の校正を行うため、風洞内の風速を事前に知る必要がある。そのため、ピトー管を用いて全ファンへ一定値を入力した時の風速を事前に測定しておき、そのデータを用いて熱線風速計の校正を行っている。なお、以上の校正は全ファンへ同じ値を入力した時に、y 方向及び z 方向に風向が振れないと考えられる、 $y=300\text{mm}$ 、 $z=300\text{mm}$  の風洞中心部で行っている。

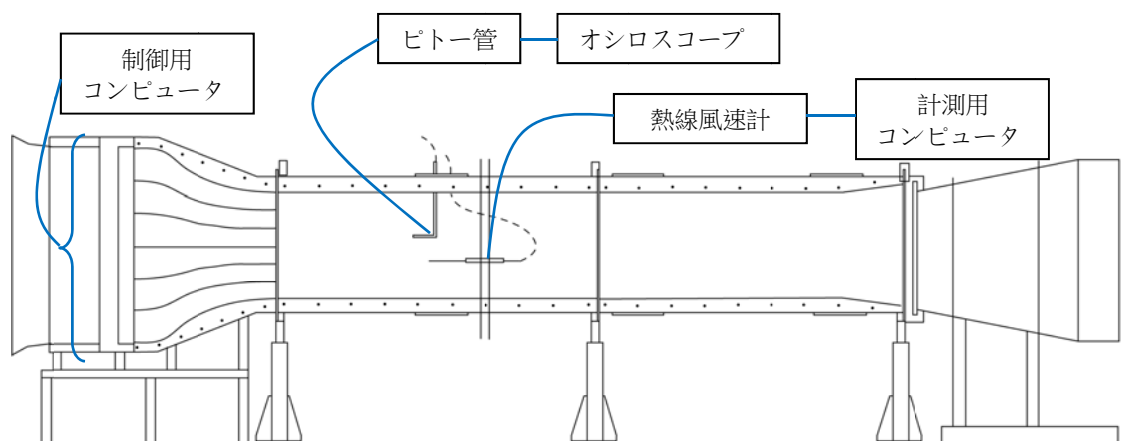


図 2.8 風速測定システム図

表 2.2 測定機器

x型熱線風速計	KANOMAX MODEL 0252R-T5 Serial No.1542
I型熱線風速計	KANOMAX MODEL 0251R-T5 Serial No.5655
プローブサポート	KANOMAX Probe Support 0107
熱線風速計	KANOMAX MODEL IFA300 Serial No.334D
ピトー管	ツクバリカセイキ株式会社 F202 JIS型ピトー管
オシロスコープ	YOKOGAWA DL750 Scope Corder MODEL 701210
圧力計	風工房 DIGITAL MANOMETER MODEL PZ-77 Serial No.C-41
測定用コンピュータ	DELL OPTIPLEX GX260
制御用コンピュータ	DELL DIMENSION 9150

## 2. 2 3列複数ファン風洞の基本的特性

### 2. 2. 1 風洞内の気流分布の確認

一定の入力を与えた時の測定胴内の気流性状を調べる。18個のファンに対して  $V/t = 4v$  の一律な入力を与えて、測定胴内の3次元的な風速の分布具合を調べる。x型プローブは主流方向とその直角方向の成分について流速を計測することができるため、設置角度を変えることで、y方向、z方向のそれぞれについて風速を測る。測定地点は図2.9に従う。x方向には、 $x=500\text{mm}$ ,  $1000\text{mm}$ ,  $1500\text{mm}$ ,  $2000\text{mm}$ ,  $2500\text{mm}$ ,  $3000\text{mm}$  の計6点、y方向には、 $y=100\text{mm}\sim 500\text{mm}$  を  $100\text{mm}$  毎に計5点、z方向には、 $z=50\text{mm}\sim 550\text{mm}$  を  $50\text{mm}$  毎に計11点の計330点について、それぞれでy方向、z方向について測定を行い、合計660回の測定を通じて測定胴内の風速、風向を測定した。図2.10から図2.15に各測定面における風速分布と風向分布をコンター図及びベクトル図で示す。なお、コンター図上に示されている点線は縮流されたファン口の区切りを表したものである。

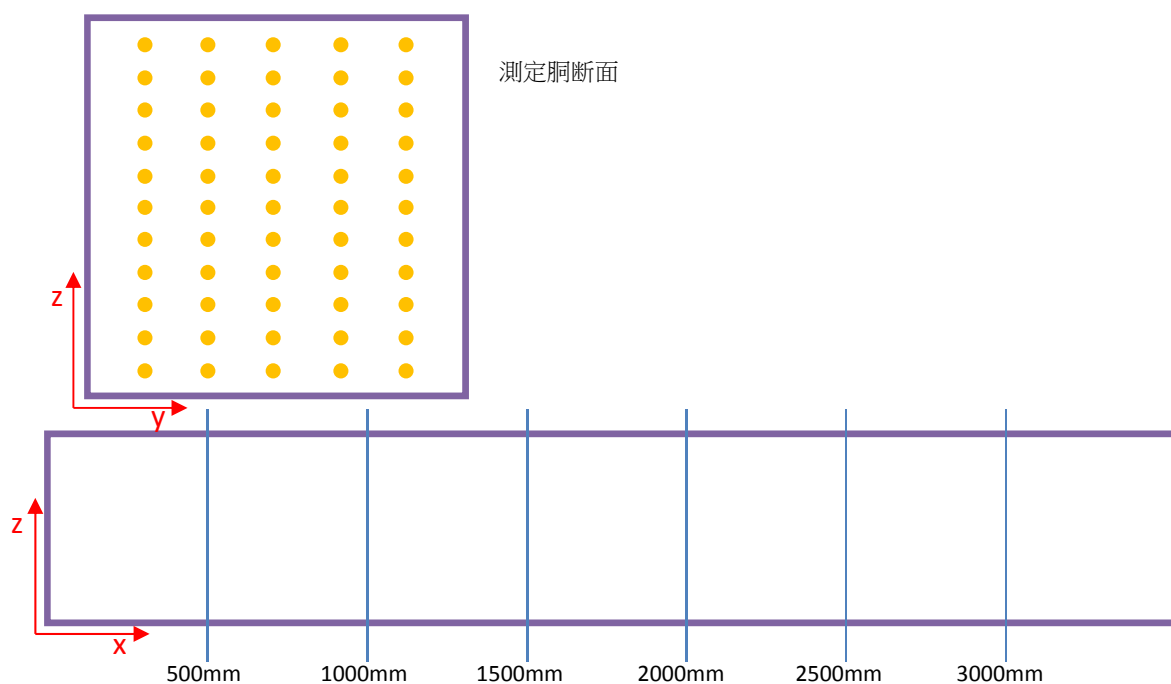


図 2.9 測定位置

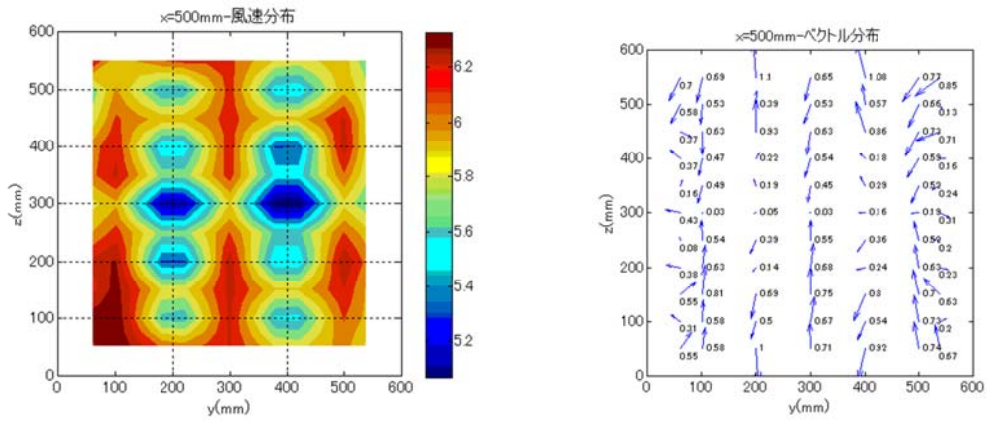


図 2.10  $x=500\text{mm}$  平面における風速、風向分布

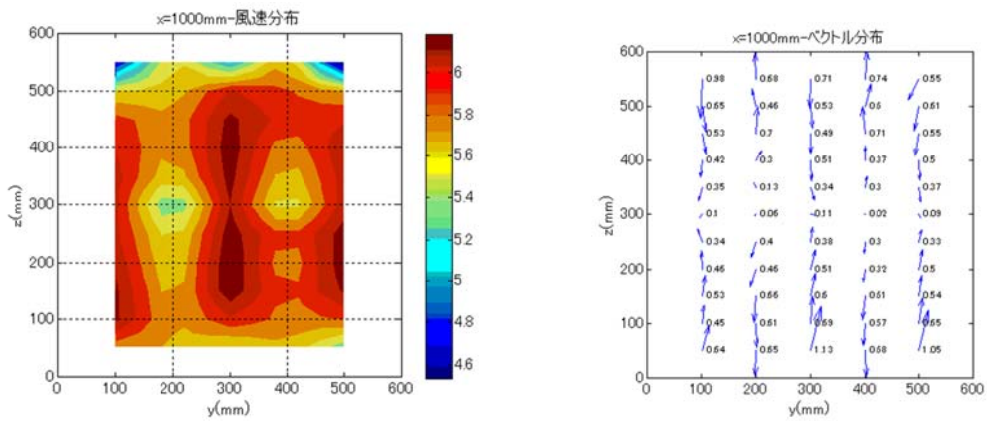


図 2.11  $x=1000\text{mm}$  平面における風速、風向分布

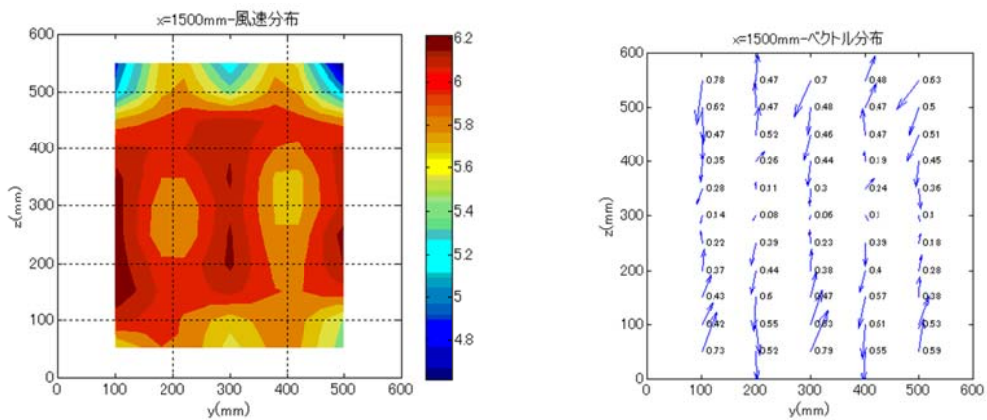


図 2.12  $x=1500\text{mm}$  平面における風速、風向分布

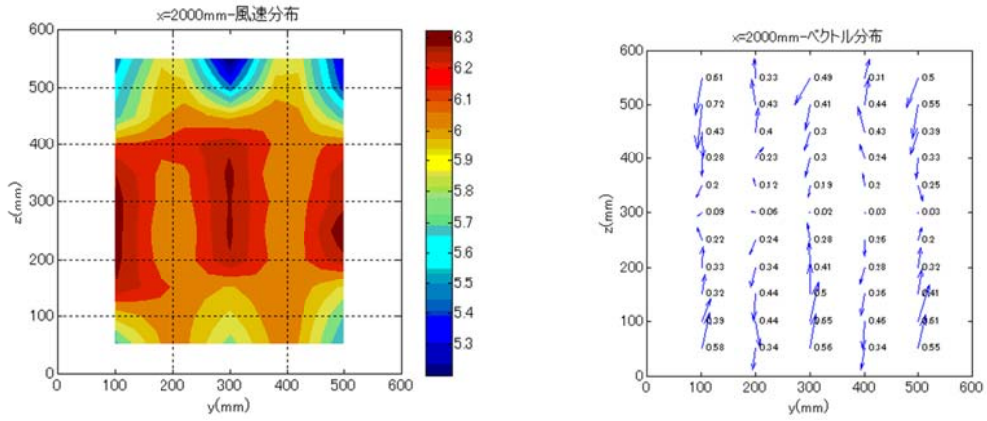


図 2.13 x=2000mm 平面における風速、風向分布

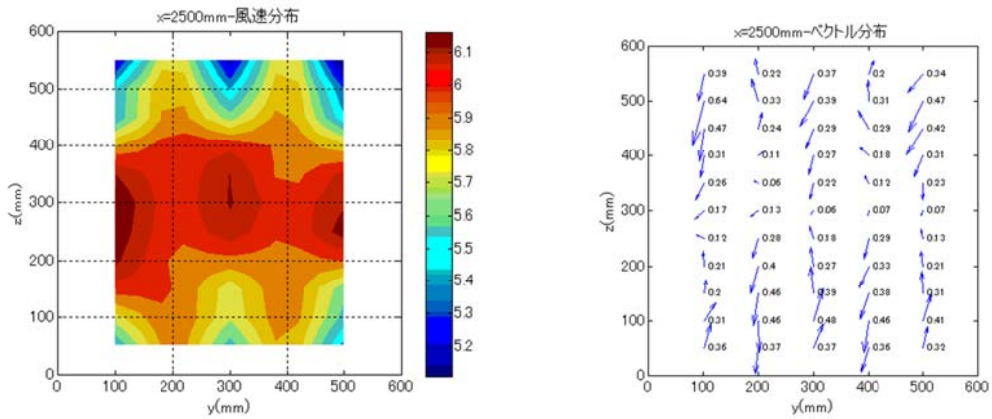


図 2.14 x=2500mm 平面における風速、風向分布

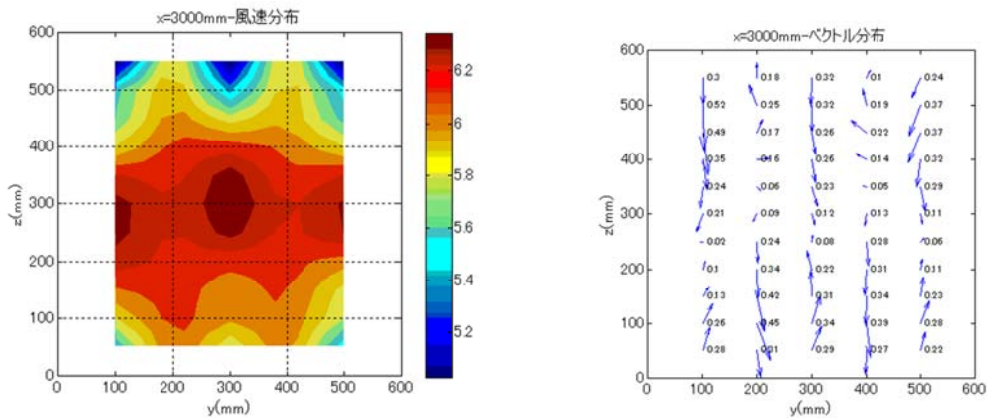


図 2.15 x=3000mm 平面における風速、風向分布

まず、いずれの計測面についても共通して言えることとして、 $y=300\text{mm}$ 、及び、 $z=300\text{mm}$  の線を中心とした対称分布となっていると言える。このことから、風洞内部の材料等の違いはある程度無視でき、風洞の対称性が保たれているこ

とが分かる。ただし、風洞上部の測定点で風速が若干低下していることには、トラバースの形状が影響しているものと考えられる。また、 $y=100\text{mm}$  と  $y=500\text{mm}$  の面だけでなく、 $y=300\text{mm}$  の面についても、風速の分布形状や  $z$  方向で中心に向かう様な風向の傾向等、ほぼ同じ結果が得られた。これらの位置は、それぞれファンの列の中心に位置する場所である。逆に  $y=200\text{mm}$  と  $400\text{mm}$  の面はファンとファンの境目にあたる場所となっている。その位置では、風速成分が小さいほかにも、上下方向に風向が振れていて、 $y=300\text{mm}$  などと比較して、分布の様子が大きく異なっているといえる。

また、 $x=500\text{mm}$  から順に見てみると、 $x=500\text{mm}$  の時には  $(y, z) = (200, 200)$  ,  $(200, 300)$  ,  $(400, 300)$  といった点で風速が低く出ていることが分かる。これらの計測点に共通していることは、ファンの吹き出し口の境目にあたる点であるということである。また、これらの差が  $x=1000\text{mm}$  ではあまり目立たなくなっていることから、ファンの吹き出し口に近い  $x=500\text{mm}\sim 1000\text{mm}$  付近では、各点については対応する各ファンの影響が非常に大きく出ているということが考えられる。

また、その後も  $x$  方向に進むにつれて、 $z=300\text{mm}$  の風洞中心部で風速が大きくなっていく様子が確認できる。

このような結果が得られた原因として、風洞の縮流の仕方が影響しているものと考えられる。図 2.1 にあるように、本風洞は  $z$  方向に対しては  $5/9$  の圧縮比で縮流されているが、 $y$  方向に対しては縮流されていない。その為、ファンによって生み出された気流が整流格子を通過して測定胴に至るまでに、壁面付近における風速成分の低下が促進され、プロファイルが形成されているものと考えられる。また、 $z$  方向についても、 $z=300\text{mm}$  における縮流胴の仕切り板が角度を持たず、平らなために風速が低下しているものと考えられるため、ファンに近い場所では中心部で特に風速が小さくなっていると考えられる。

以上の結果から、以降の風向変化の検討に際して、各ファンの回転数に差をつけた時に大きく違いが表れそうである  $x=0\text{mm}\sim 1000\text{mm}$  付近で測定を行えばよさそうであるといえる。

## 2. 2. 2 入力電圧と風速の関係

実際に各ファンを制御する際には、時刻歴データを0～6Vの電圧値に変換して制御を行う。まず、入力電圧に対する出力としての風速の関係を調べる。熱線風速計を(x, y, z) = (1000, 300, 300)に設置し、18個全てのファンに対する入力電圧  $V_{lt}$  を0Vから6.5Vまで変化させながら風速を測定した。測定結果を図2.16に示す。入力電圧  $V_{lt}$  と平均風速  $\bar{U}$  との間には明確な比例関係が見てとれ、1次近似によって2.1式が得られる。

$$\bar{U} = 1.63 \times V_{lt} - 0.22 \quad (2.1)$$

この式は喜々津<sup>\*2-1</sup>による1列複数ファン試作風洞における測定結果と比較しても良好な結果が得られていることが確認できる。

また、本風洞では3次元的な計測が可能になったことから、風洞の各場所における、入力電圧と風速の関係についても確認する。測定箇所は、yz平面における入力電圧と平均風速の関係をファンに近い場所と遠い場所で調べるものとし、x方向には、x=1000mm, 3000mmの計2点、y方向には、y=100mm～500mmを100mm毎に計5点、z方向には、z=50mm～550mmを50mm毎に計11点の計110点について、入力電圧  $V_{lt}$  を2V, 4V, 6Vと変化させて計測する。また、3次元的な特徴を調べるために、それぞれでy方向、z方向について測定を行うこととし、合計660回の測定を行った。図2.17から図2.22に各測定面における風速分布と風向分布をコンター図及びベクトル図で示す。

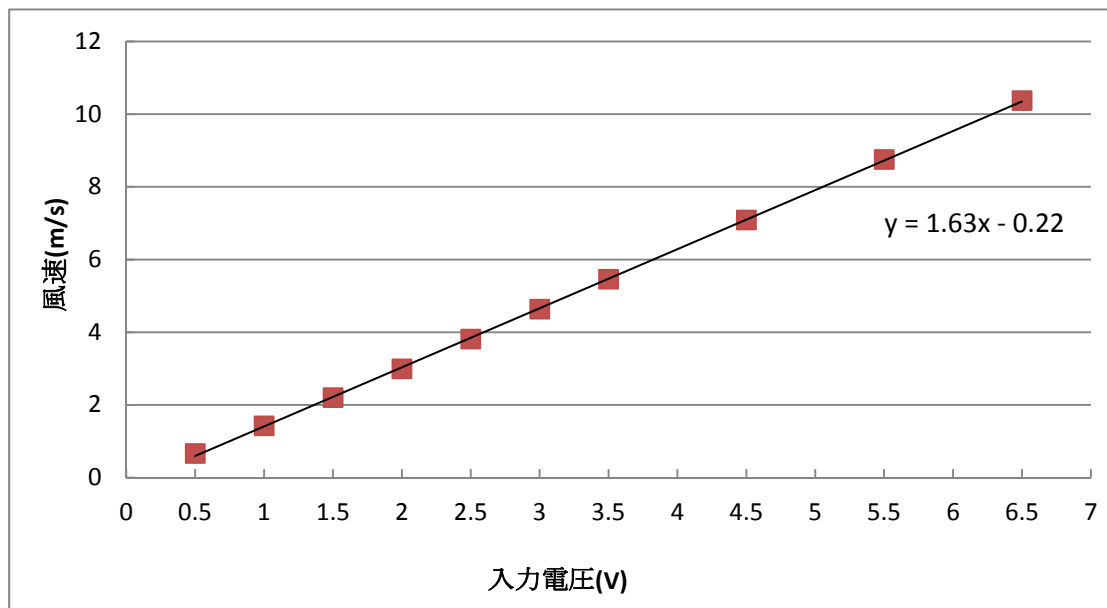


図 2.16 入力電圧と平均風速の関係

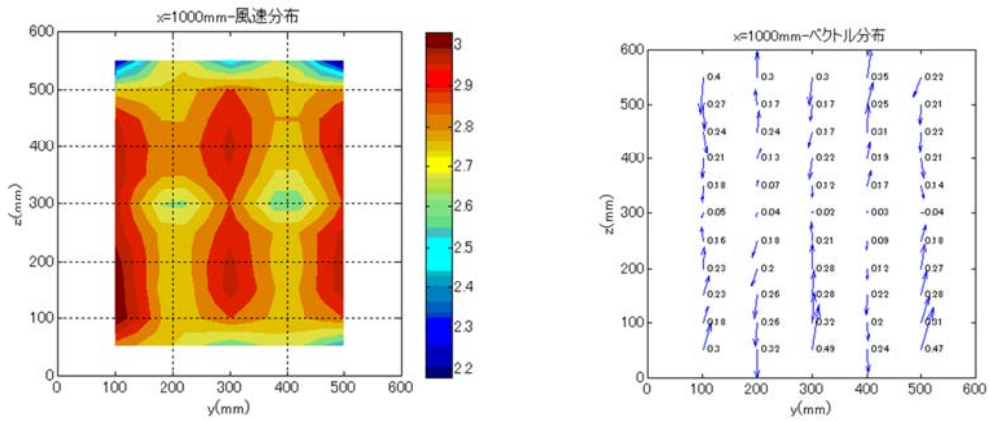


図 2.17 x=1000mm 平面の 2v 入力での風速、風向分布

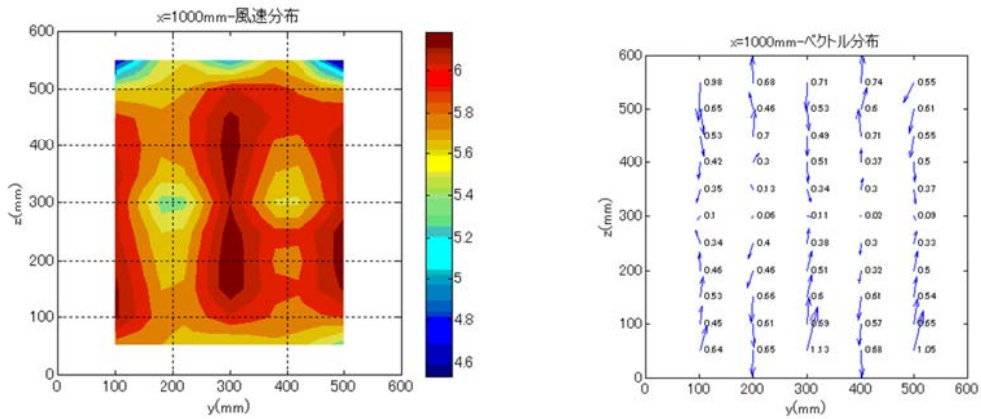


図 2.18 x=1000mm 平面の 4v 入力での風速、風向分布

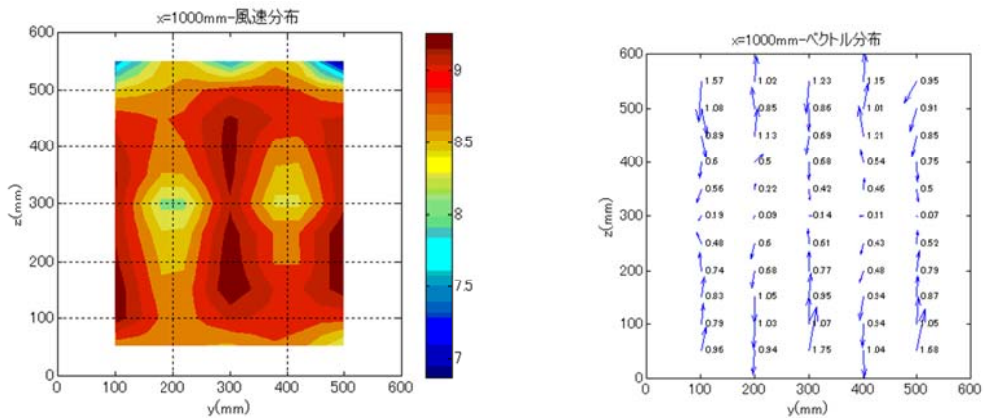


図 2.19 x=1000mm 平面の 6v 入力での風速、風向分布

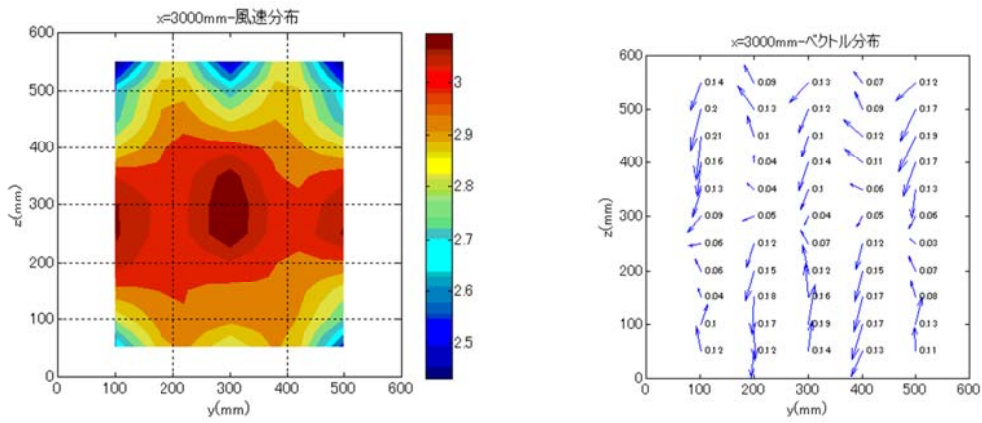


図 2.20  $x=3000\text{mm}$  平面の 2v 入力での風速、風向分布

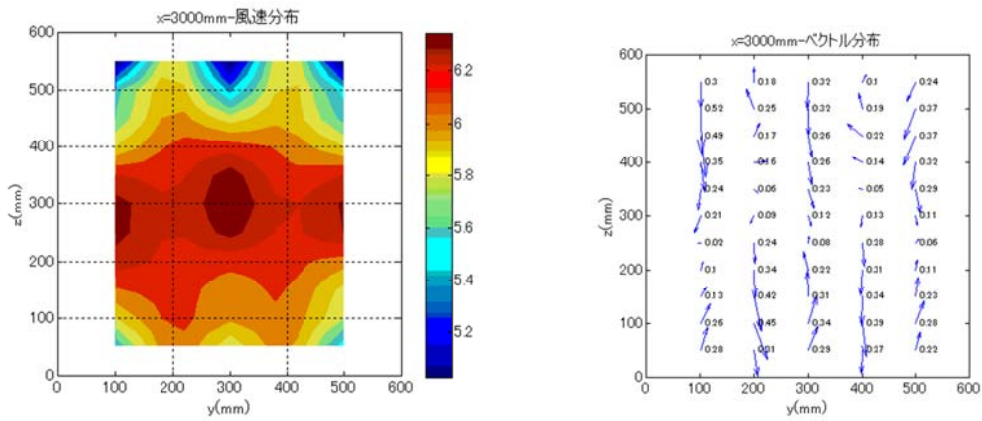


図 2.21  $x=3000\text{mm}$  平面の 4v 入力での風速、風向分布

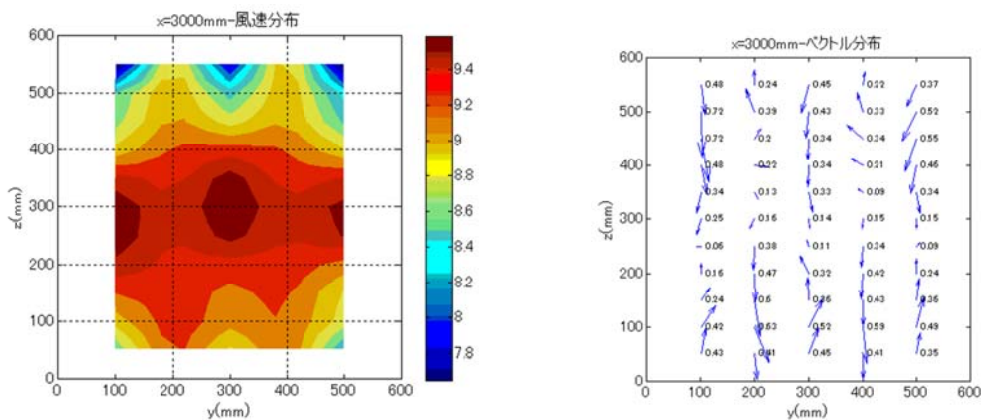


図 2.22  $x=3000\text{mm}$  平面の 6v 入力での風速、風向分布

この結果をみる限り、入力電圧によっても風速の分布の様子はほとんど変わらず、それぞれの地点における風速が比例的に大きくなっているように見て取



れる。特に、風向に関しても、ベクトルの向きは変化しない一方で、スカラー値が比例的に大きくなっている様子が確認できる。また、入力を大きくしても、 $y=100, 300, 500\text{mm}$ における結果の同一性と、 $y=200, 400\text{mm}$ における結果の同一性は崩れないことを確認した。

これらの結果をグラフにしてまとめたものを図 2.23 から図 2.28 に示す。この図では、 $y=100, 300, 500\text{mm}$ における結果と、 $y=200, 400\text{mm}$ における結果はそれぞれ同一であるということとして、代表的に  $y=200\text{mm}$  と  $y=300\text{mm}$  における測定値をグラフに示している。

結果を見てみると、風速成分はやはり測定点ごとに比例的に増大している様子が見て取れる。その際、例えば図 2.23 では、 $y=300\text{mm}$  では  $z=50\text{mm}$  と  $z=550\text{mm}$  で風速が低下しているといった鉛直分布上の特徴も保存されたまま計測されていることが確認できる。

また、風向の  $y$  成分は、 $x=1000\text{mm}$ 、 $x=3000\text{mm}$  の両方の測定において、 $-2$  度～ $2$  度の範囲を超えるものはほとんどなく、結果はそれぞればらばらであり特徴は見いだせないものの、誤差として扱える範囲のものであると考えられる。

それに対して、風向の  $z$  成分については、それぞれ  $y=200\text{mm}$  地点では風洞の上下に向かうような風向、 $y=300\text{mm}$  地点では風洞の中央に向かう方向で、対称的な分布になっていることが分かる。また、その値は入力電圧が大きくなっても変化せず、風速によらない安定した結果が得られていることが分かる。また、 $x=1000\text{mm}$  における測定値に対して、 $x=3000\text{mm}$  における測定値が半分程度に小さくなっていることが確認できる。

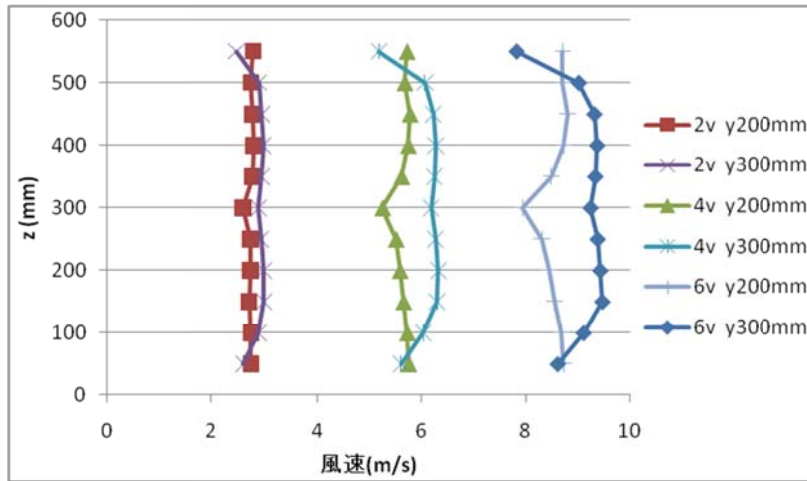


図 2.23  $x=1000\text{mm}$  における風速鉛直分布

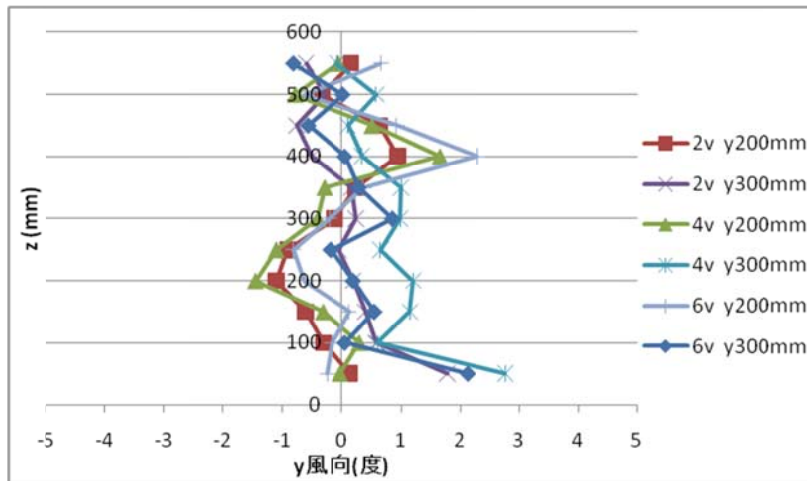


図 2.24  $x=1000\text{mm}$  における  $y$  方向の風向鉛直分布

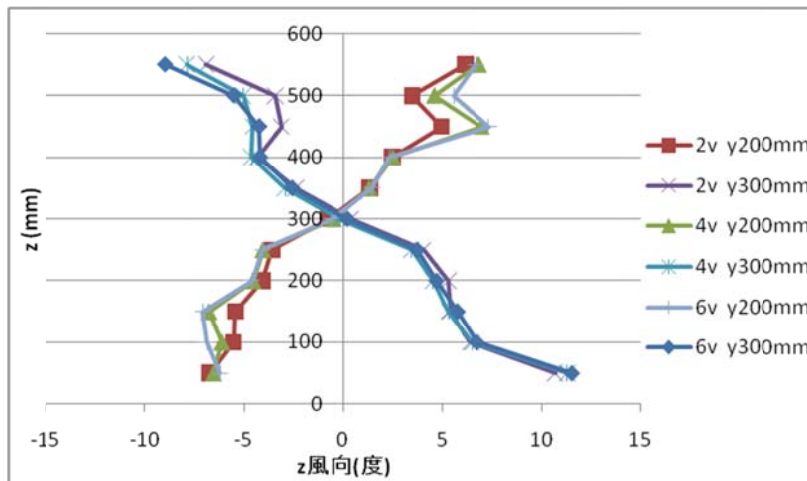


図 2.25  $x=1000\text{mm}$  における  $z$  方向の風向鉛直分布

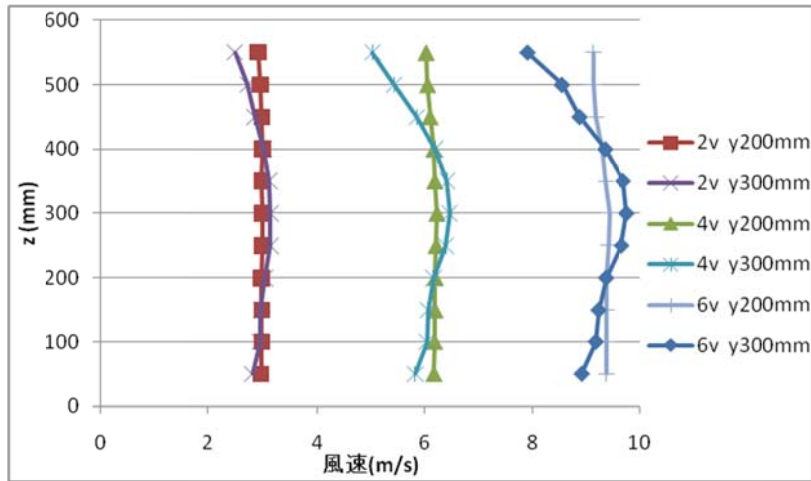


図 2.26  $x=3000\text{mm}$  における  $z$  方向の風向鉛直分布

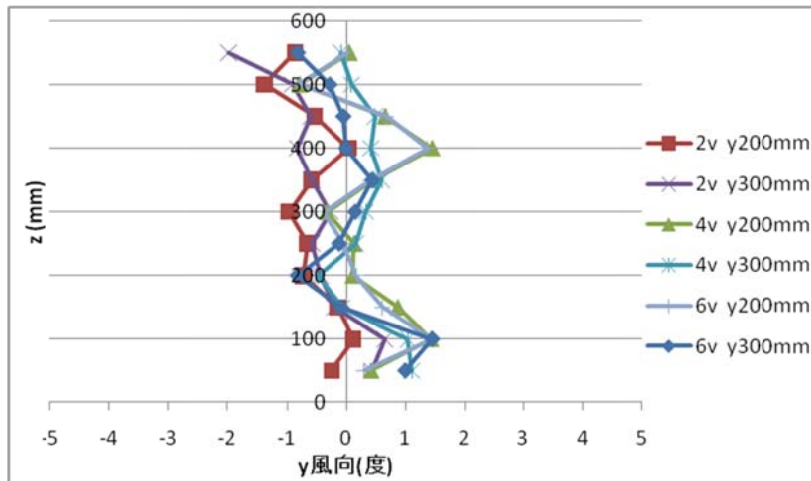


図 2.27  $x=3000\text{mm}$  における  $z$  方向の風向鉛直分布

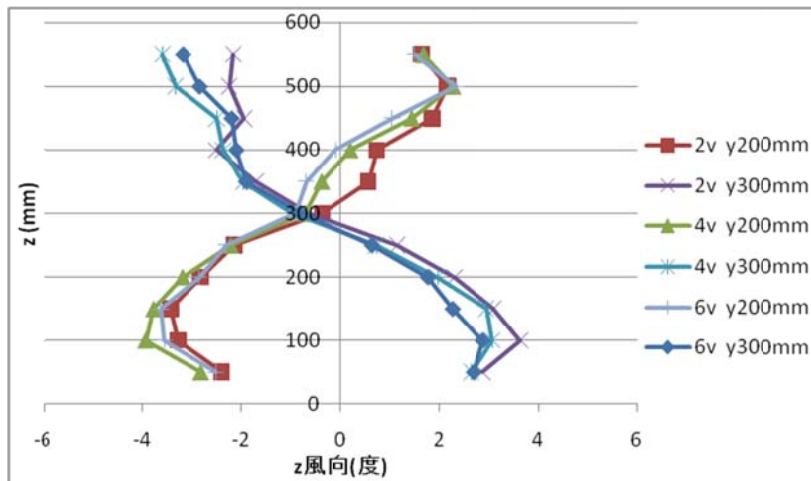


図 2.28  $x=3000\text{mm}$  における  $z$  方向の風向鉛直分布

### 2. 2. 3 1列複数ファン風洞との比較

ここで、1列複数ファン風洞における測定結果と比較する。図 2.29 は  $x=1000\text{mm}$ 、 $z=350\text{mm}$  の地点に設置したピトー管で、すべてのファンに一律に  $0\text{v}$  から  $5\text{v}$  まで  $0.5\text{v}$  刻みで電圧を入力した場合の風速を求めたものである。3列の時と同様、明確な比例関係を見て取ることが出来、次式で表される。

$$U = 1.10 \times V_{\text{t}} - 0.28 \quad (2.2)$$

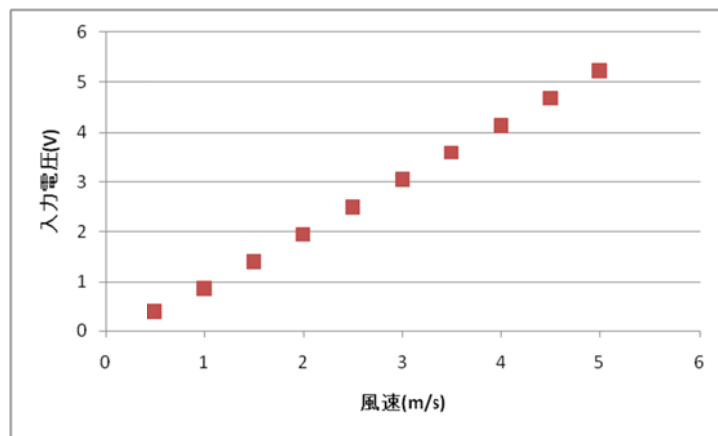


図 2.29 1列複数ファン風洞における入力電圧と風速の関係

この図と3列複数ファン風洞における測定結果である図 2.16 を重ねたものを図 2.30 に示す。

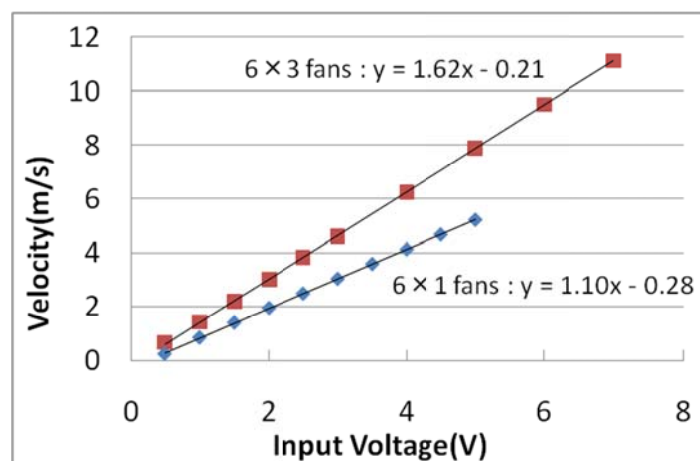


図 2.30 1列と3列における入力電圧と風速の関係

図 2.30 では、どちらの場合も明確な比例関係が見て取れるものの、その数値は異なっている。これには入力電圧に対するファンの回転数の設定が違って

いる結果であると考えられ、2.1式と2.2式を比較した場合、1列複数ファン風洞に与えた入力電圧の時と同じ風速を得たいときには、

$$Vlt_3 = \frac{2}{3}Vlt_1 \quad (2.3)$$

の入力を与えればよいことになる。

また、1列複数ファン風洞の  $x=1000\text{mm}$  における風速と風向の鉛直分布の測定結果をそれぞれ図 2.31 と図 2.32 に示す。

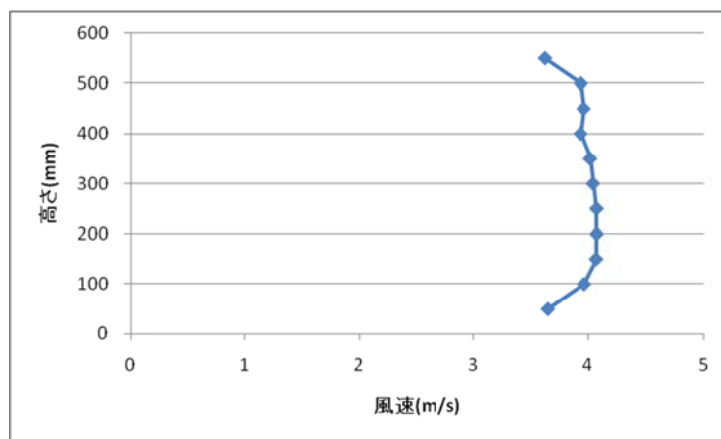


図 2.31 風速鉛直分布

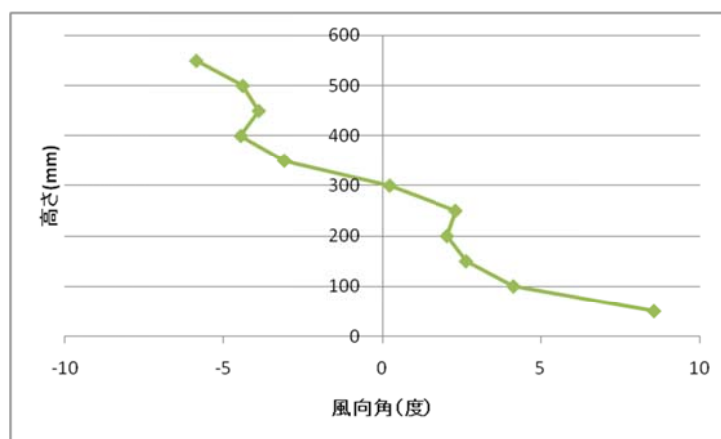


図 2.32 z 風向鉛直分布

図 2.31 では、 $z=150\sim 450\text{mm}$  の範囲において、良好な風速の分布の均一性を見て取ることが出来る。また、図 2.32 では、風洞中心に向かう風向によって場が形成されている様子が確認できる。

これらの結果を3列複数ファン風洞における結果と重ねたものを図 2.33 と

図 2.34 に示す。

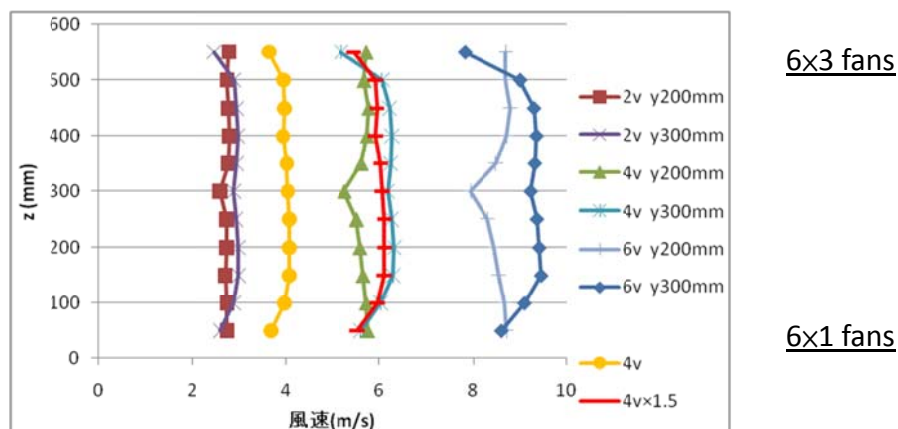


図 2.33 x=1000mm における風速鉛直分布

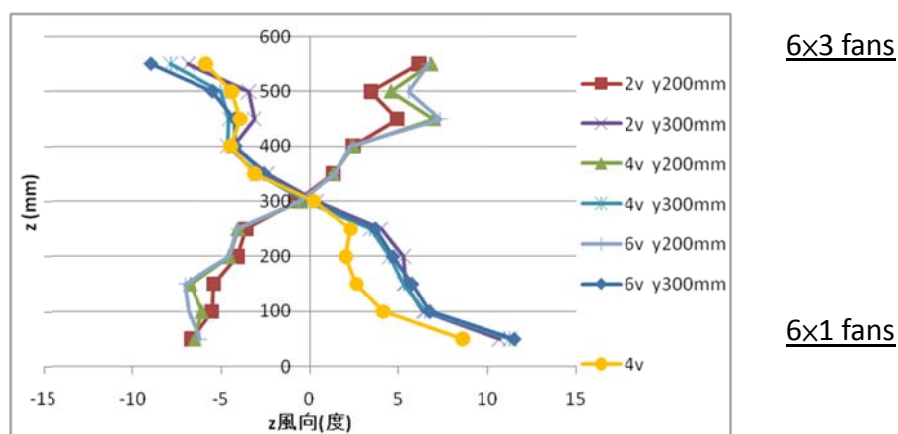


図 2.34 x=1000mm における z 風向鉛直分布

これらの図から、1 列複数ファン風洞における風速の測定値は、3 列複数ファン風洞における  $y=100, 300, 500\text{mm}$  地点における測定値とよく対応関係にあることが伺える。また、2. n 式に従って、1 列複数ファン風洞における測定値を  $3/2$  倍したものをグラフに乗せているが、3 列複数ファン風洞における  $4v$   $y=300\text{mm}$  での測定値とほぼ一致することが分かる。また、風向についても、 $z=100\sim 250\text{mm}$  の範囲で小さくなっているものの、3 列複数ファン風洞の  $y=300\text{mm}$  における測定値に近い値が得られている。

以上のことから、適切な入力値を与えることで、3 列複数ファン風洞は 1 列の時の実験についても再現できそうであることが分かった。

### 第三章

## スペクトル特性とココヒーレンスを模擬した気流の作成

### 3. 1 制御周波数に関する検討

帯域幅 0.5Hz の変動成分を持つ時刻歴波形を作成し、その気流を測定した。図 3. 1 に変動風速の作成概要を示す。入力する変動風速は、 $0 < f \leq 4\text{Hz}$  のパワーが一定のパワースペクトルを帯域幅 0.5Hz の 8 通りに分割し、それぞれの分割された周波数帯域の変動をもつ電圧波形である。最小電圧、最大電圧がそれぞれ 0V, 5V で、 $\Delta t = 0.03\text{s}$ ,  $N = 2048$  個の時刻歴を各ファンに入力して、最適的な位置で測定した。平均電圧は 2.5V、乱れの強さは約 30%である。

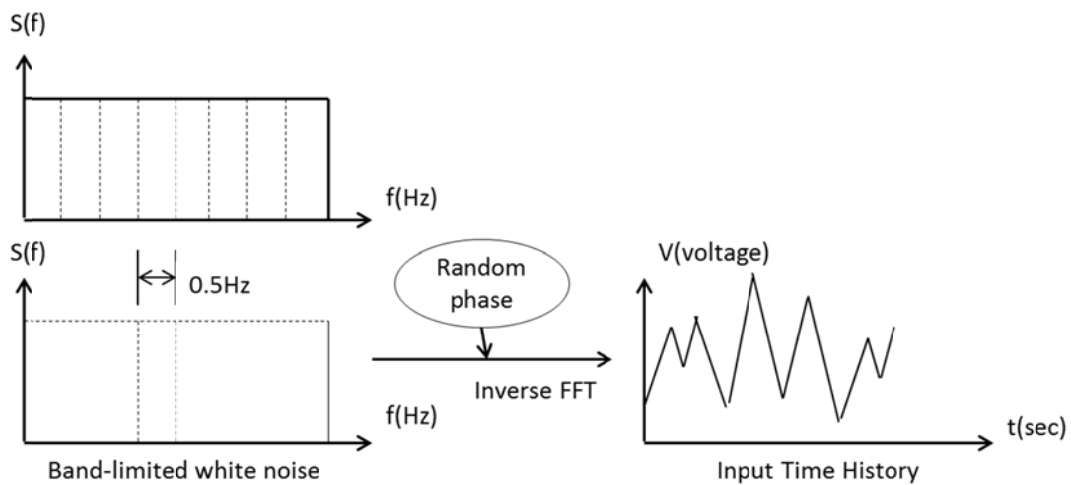


図 3. 1 変動風速作成の概要

各帯域の変動を有する入力電圧の一例を載せ、それらを測定した時刻歴波形を FFT によって、図 3. 2 は 0.0~0.5Hz 帯域のパワースペクトルの比較に示す。

考察について、入力帯域が高周波数帯域になるにつれて、風速変動が小さくなっている。ファンの回転数が大きな振幅に追従できずに回転数が一定に近い波形になる。また、風洞内気流が高周波数の変動に追従しにくい特性を持つ。ただし、1.5Hz 以上の入力帯域の測定結果をみると、目標とした帯域以外の高周波数領域のパワーが大きくなり、さらに 0.1~1.0Hz の低周波数領域にもパワーが現れる。本研究の複数ファン風洞におけるスペクトル模擬時の高周波数側の限界を示唆しており、模擬気流のパワースペクトルが高周波数側に偏る場合は、この点を顧慮する必要がある。



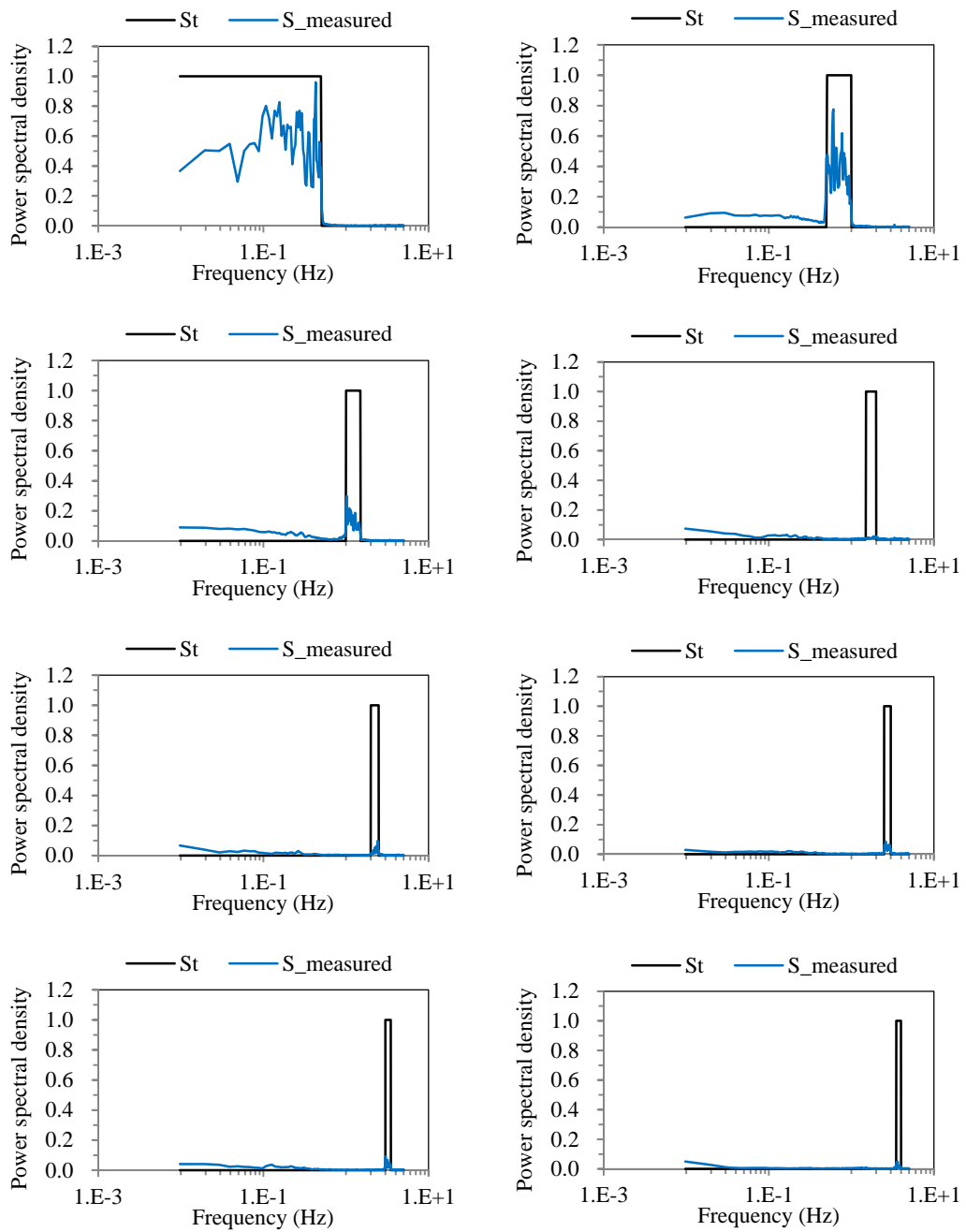


図 3. 2 スペクトル制御周波数範囲

### 3. 2 スペクトル特性を模擬した気流の作成

ここで評価する乱流特性は、乱れの強さ、乱れのスケール、変動風速のパワースペクトルである。模擬する際の風速  $V$ 、距離  $L$ 、時間  $T$  のスケールは次式で設定する。

$$\frac{V_{model}}{V_{full}} = \frac{L_{model}}{L_{full}} = \frac{1}{10} \quad \frac{T_{model}}{T_{full}} = \frac{1}{1} \quad (3.1)$$

気流の模擬を想定する測定高さ<sup>1)</sup>と地表面粗度区分は、基準となる高さ 10m、基準高さの平均風速 30m/s、地表面からの高さ 40m、べき指数 0.27。また、入力する時刻歴の時間刻みは 0.124 秒、データ数 1024 個とするので、継続時間は 127 秒である。その制御の流れについて以下の概要を示す。

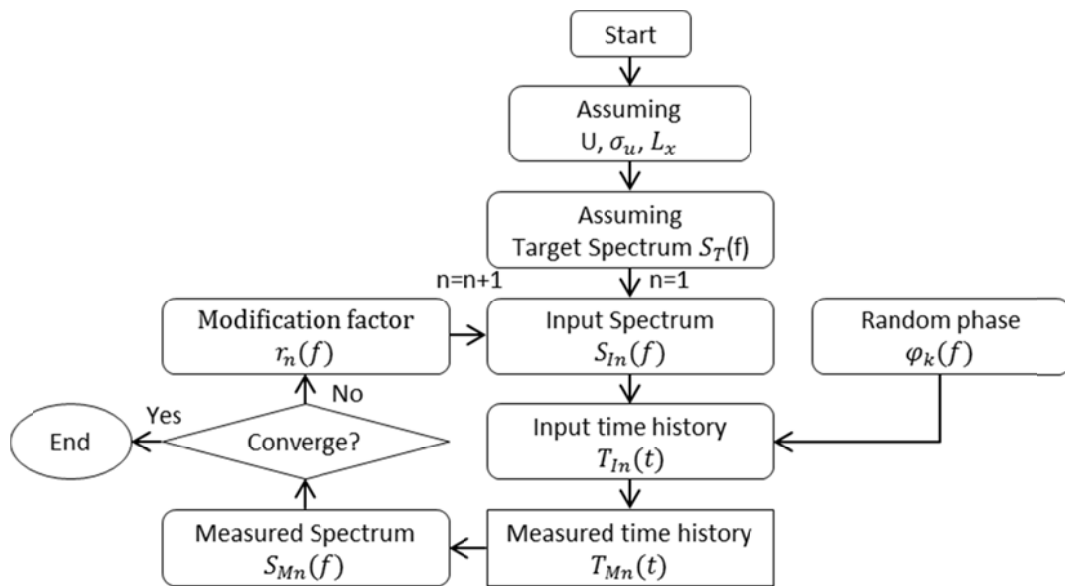


図 3.3 スペクトル制御の流れ

本研究で用いるパワースペクトルの設定については、風洞が主流方向と鉛直方向のみを考慮した 2 次元型であるので、明らかに等方性乱流場は保証されていないが、カルマン式の適用が主流になった現状や空間相関関数との理論的整合性を鑑みて、カルマン式に基づいて模擬気流の設定を行う。具体的には、入力時刻歴の作成は逆 FFT によって、数個の定常確率ガウス過程の時刻歴をシミュレートする。その数個の定常確率ガウス過程の時刻歴を測定して、FFT 変換すると、パワースペクトルの測定値に対する目標値の比をもとに回転数の制御

を行い、修正係数に基づいて行う。

$$r_n(f) = \frac{S_T(f)/\sigma_u^2}{S_{Mn}(f)} \quad (3.2)$$

パワースペクトルの収束条件では、以下の平均 2 乗根誤差で発散する傾向を把握することによって、収束の評価をした。

$$\text{err} = \sqrt{E \left[ \frac{(E[S_M(f)] - S_T(f))^2}{S_T(f)^2} \right]} \quad (3.3)$$

本試作風洞の測定結果について、測定位置は  $x=1000, y=300, z=300\text{mm}$  で、測定と入力と同じに  $\Delta t = 0.124$  秒、 $N = 1024$  個である。測定結果の一例を図 3.4 を示す。

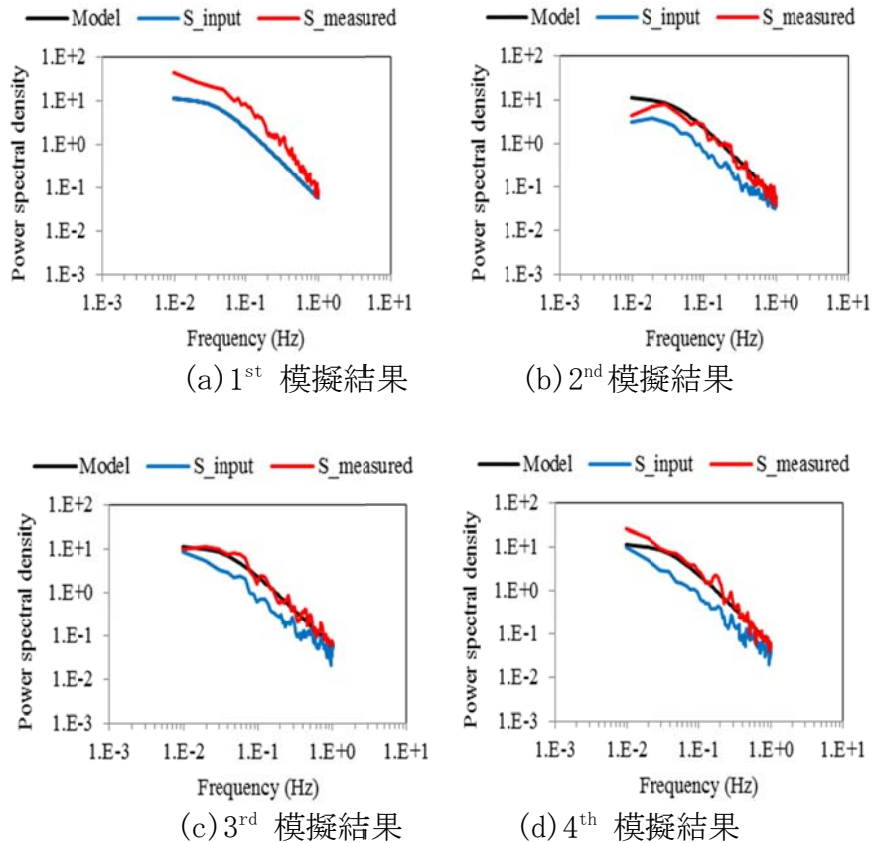


図 3.4 パワースペクトル収束状況

ここで提案した制御手法によって、主流方向の乱れの強さ、乱れのスケール、変動風速のパワースペクトルの目標値を忠実に再現できたといえる。

### 3. 3 ココヒーレンス特性を模擬した気流の作成

目標とする変動風速のパワースペクトルとココヒーレンスが与えられたときに、それらの乱流特性を有する気流の模擬を試みる。本節で気流を制御する手法を提案する。変動風速のパワースペクトルとココヒーレンスを目標値に合わせるのが目的であるが、両者の値を同時に制御するのは困難なので、両者をそれぞれと独立に操作、まず各高さの変動風速のパワースペクトルを目標値に収束させ、その後2点間のココヒーレンスを目標値に合わせるという流れをとった。図3.5に制御の流れを示す。

まずは変動風速のパワースペクトルの模擬をすると、各ファンに入力する収束したパワースペクトルを図3.6のとおりである。 $S_{Ia}(f)$ 、 $S_{Ib}(f)$ 、 $S_{Ic}(f)$ は $S_{row1}$ 、 $S_{row2}$ 、 $S_{row3}$ 列に入力する収束したフーリエ振幅である。さらに、両段の位相差は図3.6のように入力すると、両点の測定位置は $z=150\text{mm}$ と $450\text{mm}$ に設定し、測定値のパワースペクトルとココヒーレンスを計算して、図3.5のような気流の制御を行う。

ここで制御流れの位相差 $\varphi_{2n}(f) - \varphi_{1n}(f)$ の標準偏差 $\sigma_n(f)$ と目標するココヒーレンス $C_T(f)$ との関係式の導入をする。2点 $z_1$ 、 $z_2$ における変動風速 $x_1(t)$ と $x_2(t)$ を以下のように表す。

$$x_1(t) = \int_0^{\infty} X_1(f, \varphi_1) e^{i2\pi ft} df \quad (3.4)$$

$$x_2(t) = \int_0^{\infty} X_2(f, \varphi_2) e^{i2\pi ft} df \quad (3.5)$$

(3.4)と(3.5)式より、2点間の変動の相互相関関数 $R_{12}(\tau)$ を得られる。

$$R_{12}(\tau) = \int_0^{\infty} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} X_1^*(f, \varphi_1) X_2(f, \varphi_2) \right] e^{-2\pi f \tau} d\tau \quad (3.6)$$

$R_{12}(\tau)$ のフーリエ変換が以下のクロススペクトル密度関数 $S_{12}(f)$ に相当する。

$$S_{12}(f) = E[|X_1(f)||X_2(f)|e^{i[\varphi_2(f) - \varphi_1(f)]}] df \quad (3.7)$$

また2点それぞれのパワースペクトル密度関数は次式で与えられる。

$$S_1(f) = E[|X_1(f)|^2] df \quad (3.8)$$

$$S_2(f) = E[|X_2(f)|^2] df \quad (3.9)$$

ここで(3.7) (3.8) (3.9)式において、 $S_1(f)$ 、 $S_2(f)$ は制御の流れ図の $S_T(f)$ の模擬であらかじめ得られたパワースペクトル密度関数に等しいと仮定し、フーリエ振幅 $|X_1(f)|$ と $|X_2(f)|$ が確定的であるとすると、

$$S_{12}(f) = |X_1(f)||X_2(f)|E[e^{i[\varphi_2(f)-\varphi_1(f)]}]df \quad (3.10)$$

$$S_1(f) = [|X_1(f)|^2]df \quad (3.11)$$

$$S_2(f) = [|X_2(f)|^2]df \quad (3.12)$$

ココヒーレンス $\text{coh}(f)$ は(9) (10) (11)式より、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{coh}(f) &= \frac{S_{12}(f)}{\sqrt{S_1(f)S_2(f)}} = E[e^{i[\varphi_2(f)-\varphi_1(f)]}] \\ &= E[\cos\varphi_{12}(f)] + iE[\sin\varphi_{12}(f)] \\ &(\varphi_{12}(f) = \varphi_1(f) - \varphi_2(f)) \end{aligned} \quad (3.13)$$

実部のココヒーレンス $C_{12}(f)$ は次式になる。

$$C_{12}(f) = E[\cos\varphi_{12}(f)] \quad (3.14)$$

ところで、確率変数 $\varphi_1(f)$ の確率密度関数 $p_1(\varphi_1(f))$ を以下の一様分布型とする。

$$p_1(\varphi_1(f)) = \frac{1}{2\pi} \quad (3.15)$$

確率変数 $\varphi_{12}(f)$ の確率密度関数 $p_{12}(\varphi_{12}(f))$ を以下のガウス分布型とする。

$$p_{12}(\varphi_{12}(f)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{12}(f)} \exp\left[-\frac{\varphi_{12}(f)^2}{2\sigma_{12}(f)^2}\right] \quad (3.16)$$

整理すると、次式を得られる。

$$C_{12}(f) = \exp\left[-\frac{\sigma_{12}(f)^2}{2}\right] \quad (3.17)$$

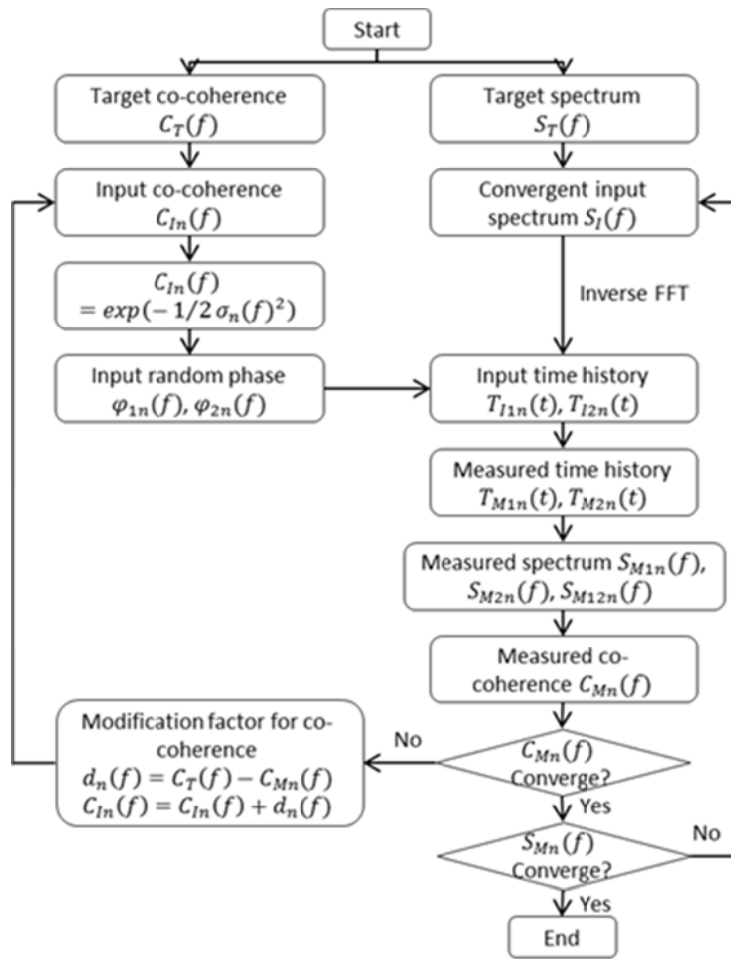


図 3.5 パワースペクトルとココヒーレンスの制御流れ

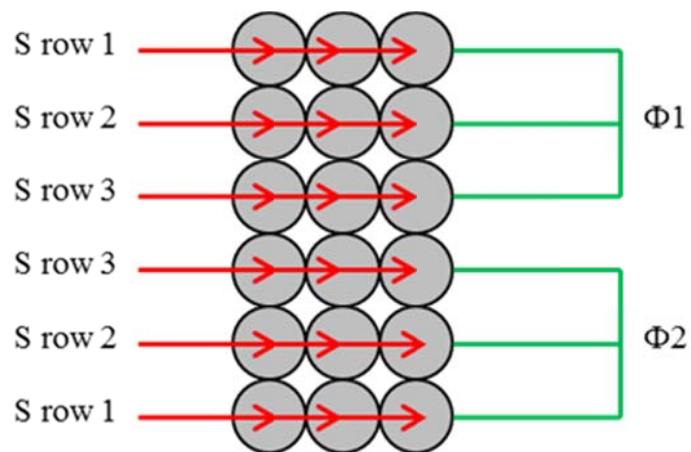


図 3.6 パワースペクトルの入力

測定結果について、2点間のココヒーレンスの制御は図3.6に示す。

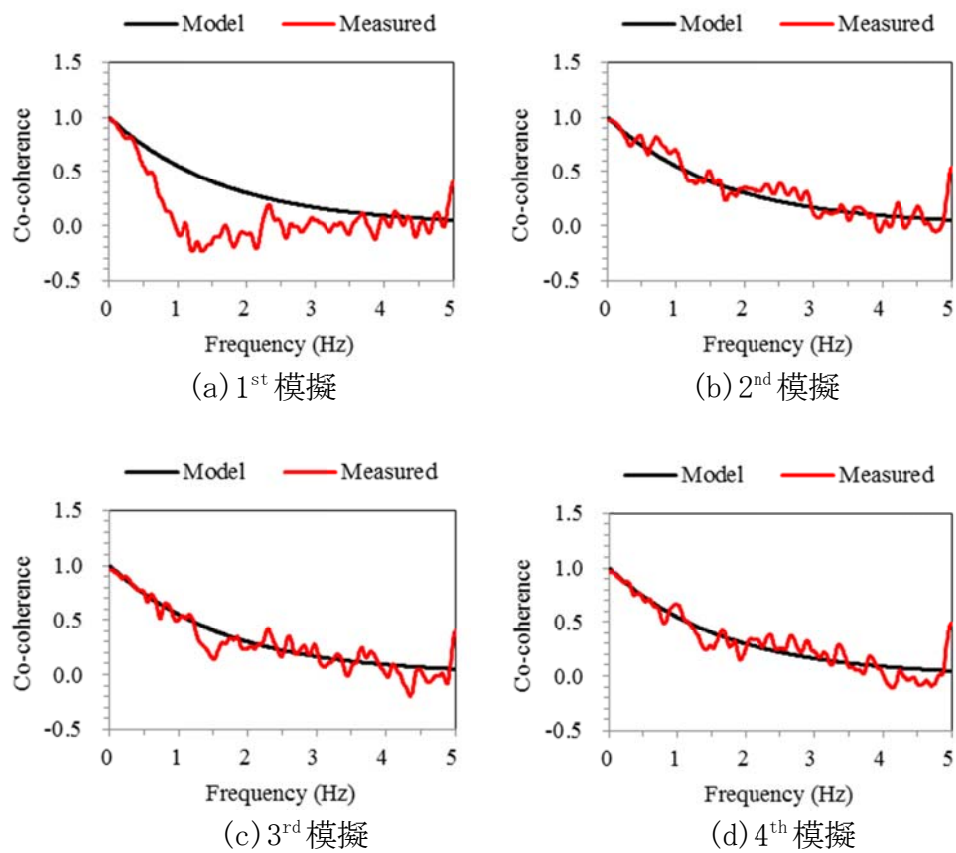


図3.6 制御後のココヒーレンス





## 第四章

### 非定常な風向変動の気流の作成

非定常な気流を作成するにあたり、まず定常な状態と非定常な状態を区別する必要がある。建築物の耐風設計によれば、流れのパターンが時間的に変化せず、位置だけの関数となる場合を定常流と呼び、対して時間的に変化するものを非定常流と呼ぶ。図 3.1 は本論における測定結果の一部であるが、定常状態と非定常状態の違いが示されている。

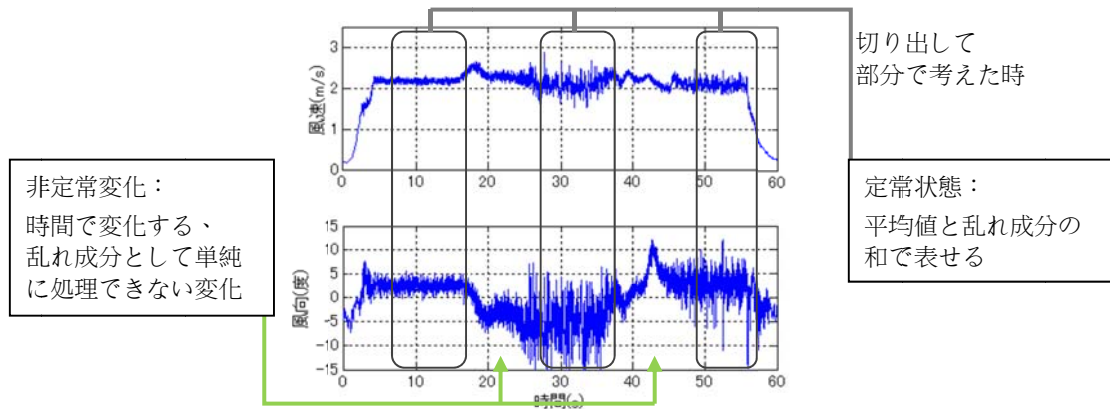


図 3.1 定常と非定常

非定常な風向変化を再現するために作成するデータは、それぞれ測定場所付近で、鉛直方向に角度を持たずに安定した気流を生む定常状態である Neutral、下方向に向きながら定常状態にある Down、逆に上向きの定常状態である Up の 3 通りの状態間を遷移することとする。図 3.2 に各定常状態の様子を示す。実際に建物の壁面に影響すると考えられる風向変化は 2 次元的なものと考えられる。

1 列複数ファン風洞における実験の手順を参考に、まず定常状態 Down の入力値について検討する。上下端の段のファンに対する入力値を検討後、中央 4 段のファンへの入力値を検討し、最適な定常状態 Down をつくる。そこから Up、及び Neutral を作成し、それぞれの定常状態間を移動する形のデータを作成し、非定常な風向変化を再現することにする。

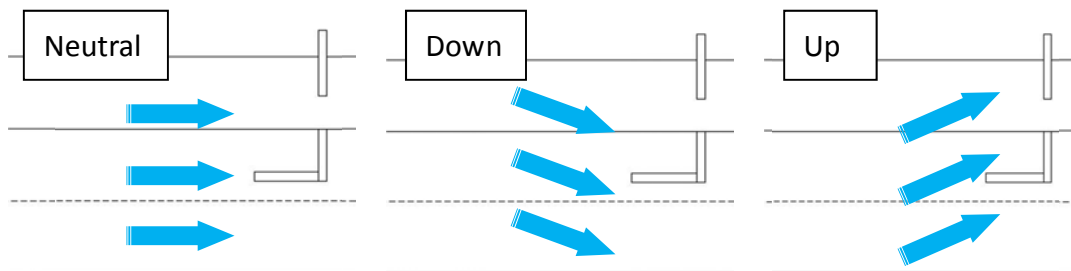


図 4.2 各種の定常状態

## 4. 1 作成目標とする気流性状と実験要件

### 4. 1. 1 1列複数ファン風洞における実験

1列複数ファン風洞において行われた実験<sup>\*3-2</sup>では、1列6段に並んだファンの内、上下のファンを停止したり、強めたりすることで、-5度から+5度の変化を起こす気流が作成された。図4.3に風速と風向の鉛直分布を、表4.1に各ファンへの入力値を示す。この実験において、模型を設置する $z=300\text{mm}$ 付近において、風速の分布が大きく異なる場合には、その影響が圧力値として出てしまうため、正確に模型表面圧力測定実験が行えなくなる。そのため、風速の分布がある程度変化せず、風向だけが大きく変化する気流をつくり出すことが必要であった。

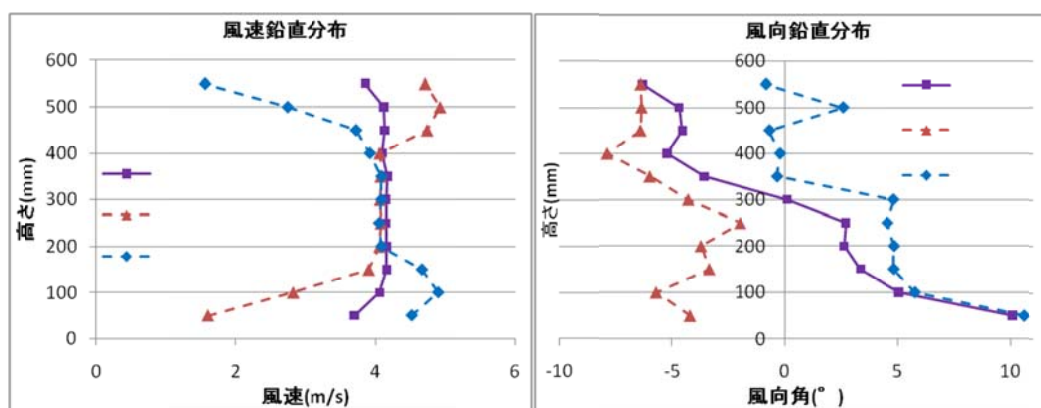


図 4.3 1列複数ファン風洞における風速・風向の鉛直分布

表 4.1 1列複数ファン風洞における入力値

fan No.	Neutral	→	Down	→	Up
fan(1, :)	4		5		0
fan(2, :)	4		4		4
fan(3, :)	4		4		4
fan(4, :)	4		4		4
fan(5, :)	4		4		4
fan(6, :)	4		0		5

よって、今回の実験でも、圧力測定実験にて模型を置くことになる $z=300\text{mm}$ 付近、とりわけ $z=250\sim 350\text{mm}$ の地点における風速の鉛直分布の安定を必要条件とし、3列複数ファン風洞において可能な限り大きな風向変化角度を得られる気流を作成することを目標とする。また、1列複数ファン風洞にて再現された約-5度から約+5度の変化も比較のために作成する。なお、本実験においては風の乱れや安定性については特には言及しないことにする。

#### 4. 1. 2 実験手順

実験装置は2章におけるものと同様の物を用いる。実際に地上で建物に作用する風向変化のほとんどは鉛直成分を持たない平面的な変化であるので、今回の実験でも2次的に風向変化を作成する。そのため、6段3列のファンのうち、同じ段のファンに対しては同一の入力を行う。

作成するデータは、それぞれ測定場所付近で、鉛直方向に角度を持たずに安定した気流を生む定常状態である Neutral、下方向に向きながら定常状態にある Down、逆に上向きの定常状態である Up の3通りの状態間を遷移することとする。作成する非定常気流では、気流の安定化のためにまず Neutral 状態にし、そこから Down、Up に変化させて風向の変化を作成する。Down と Up はちょうど逆の関係にあり、ファンに対する入力は対称になる。すなわち、Down の時に  $\text{fan}(1, :)$  に入力する値と Up の時に  $\text{fan}(6, :)$  に入力する値が同じであり、以下、 $\text{Down\_fan}(2, :) = \text{Up\_fan}(5, :)$ 、 $\dots$ 、 $\text{Down\_fan}(6, :) = \text{Up\_fan}(1, :)$  となる。今後の実験では、Down の時にどの程度の気流がつかれるかの検討を行い、それを Up にも対称に入力することとする。また、1列複数ファン風洞における実験では、上下に6つ並んだファンのうち、 $\text{fan}(1, :)$  と  $\text{fan}(6, :)$  によって主に風向変化成分を作り出し、中央4つのファンは風速の安定を主な目的として制御するのがよいと分かっている。

その際、流れ場の形成は上下端のファンについての物と中央4つのファンについての物を単純に足し合わせたものとはなりえないが、大まかな指標とはなりうる。そこで、まずは下向きの定常状態 Down をつくるために上下端のファンへの入力の検討を行い、その後中央4つのファンへの入力を決定し、そうして作成された定常気流 Down を元に、非定常変化気流を作成する。

## 4. 2 上下端のファンに対する入力値の調整

### 4. 2. 1 測定方法に基づく検討事項

本実験の測定は x 方向と z 方向の風速を求めることが必要である。しかし、本実験で用いる x 型プローブを用いた熱線風速計では、主流方向から 45 度以上傾いた風に関しては計測できないため、まず測定可能な気流であるという保証が必要となる。そのために、図 4.4 のように、上端のファンに正の回転を与え、下端のファンに負の回転を与えることで出来る基本的な流れ場 Downstream1 の風速を計測し、それに加えて最低限測定が可能となりそうである入力を中央4つのファンに与えたのちに x 型熱線プローブを用いて測定する。Downstream1 は 90 度近い風向になっていると考えられるため、ここでは I 型プローブを用いる。I 型プローブでは 2 軸の風速を測ることはできないが、風向にとらわれずに風速をスカラー値で計測することはできる。

このような計測において、風向変化はファンに近い場所で大きく出やすいことが分かっている。また、ファンを逆回転させていて逆方向の気流となっている場合には、計測機器の設置方法の関係上、その場所では測定できないことに注意する必要がある。以上の点に注意して、 $y=300\text{mm}$  の風洞中央で、x 方向は  $100\text{mm} \sim 1000\text{mm}$  の間で  $100\text{mm}$  ごとに計 10 点、z 方向は  $200\text{mm} \sim 400\text{mm}$  の間で  $50\text{mm}$  ごとに計 5 点で測定を行った。なお、入力波は  $2v$  の場合と  $4v$  の 2 ケースで行った。図 4.5 に結果を示す。

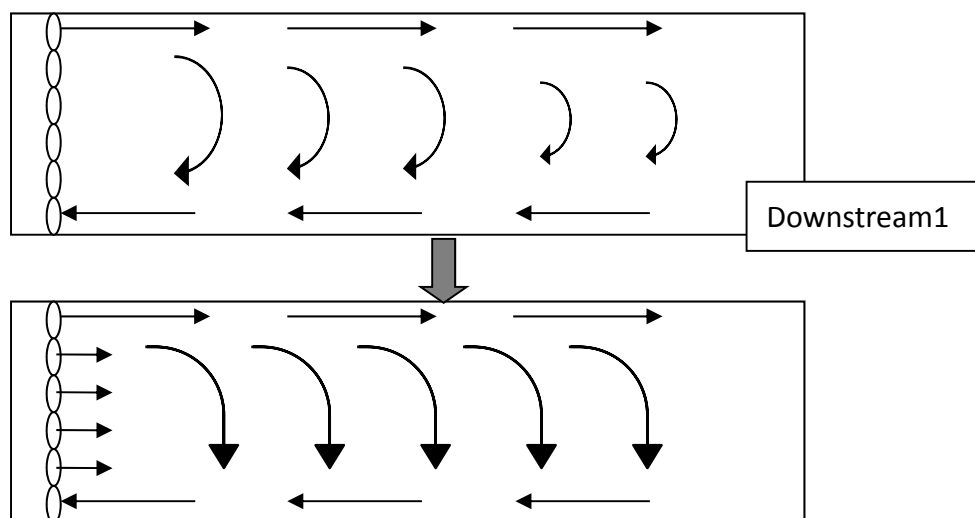


図 4.4 制御の方向性

2v 入力

4v 入力

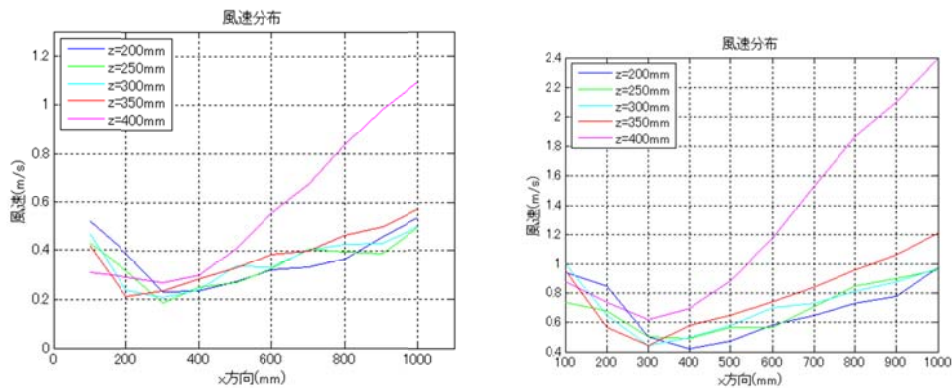


図 4.5 Downstream1 の計測結果

この結果からは、 $z=400\text{mm}$  の高さでの測定を除いた他の高さでの測定は、ほぼ同じ数値であり、かつ  $x=200\sim 400\text{mm}$  付近で最小値をとり、その数値はおおよそ  $Vlt \times 0.1$  で示される。逆に最大値は  $x=1000\text{mm}$  地点においてであり、その数値は大体  $Vlt \times 0.25$  となっている。一方で、 $z=400\text{mm}$  地点における測定では、 $x=300\sim 400\text{mm}$  地点までは他の高さにおける測定値と近いものの、それ以後は  $x$  方向に進むに従って大きく風速が上がっていく。この原因としては、正回転している一番上部のファンの影響が、 $x=400\text{mm}$  付近を区切りとして大きく影響してくるからであると考えられる。

ここで確かめたいのはどの程度の鉛直方向の風速が生まれているかである。ここで得られている風速の最大値は  $(x, z)=(1000, 400)$  の時で、それぞれ約  $1.1\text{m/s}$ 、 $2.4\text{m/s}$  であるが、 $z=400\text{mm}$  の風速の数値は主流方向の成分が大半を占めていると思われるので、風速の鉛直成分の最大値とは捉えられない。ここでその条件に当てはまるのは、 $x=1000\text{mm}$  地点における  $z=200\sim 350\text{mm}$  の数値の  $Vlt \times 0.25$  である。この値が全て鉛直成分だと仮定すると、 $x$  型プローブで計測可能な  $45$  度以内に収めるためには、仮に風速の水平成分が  $2\sim 5$  段目のファンへの入力に従うとすると、**2.1 式**に従って、

$$\tan\left(\frac{Vlt_{1,6} \times 0.25}{Vlt_{2,3,4,5} \times 1.63 - 0.22}\right) < \tan \frac{\pi}{4} \quad (4.1)$$

$Vlt_{1,6}$  : 1, 6 段目のファンへの入力電圧

$Vlt_{2,3,4,5}$  : 2~5 段目のファンに対する入力電圧

となる。これを解くと、

$$Vlt_{2,3,4,5} > \frac{1}{\pi \times 1.63} \times Vlt_{1,6} + \frac{0.22}{1.63} \quad (4.2)$$

となり、 $Vlt_{1,6} = 4$  としたとき、

$$Vlt_{2,3,4,5} > 0.92 \quad (4.3)$$

ここで上下端のファンに対する割合で表現すると、

$$\frac{Vlt_{2,3,4,5}}{Vlt_{1,6}} > 0.23 \quad (4.4)$$

となる。

この 4.4 式は、風洞内の気流場が単純な重ね合わせによって成り立つことが前提となっているが、実際には単純な重ね合わせにはならず、この式も成立しない。しかし、鉛直方向の風速をある程度制限するという目的において、おおよその目安としては有効であると考えられる。

よって、3.4 式を満たす数値として、以下の測定においては

$$\frac{Vlt_{2,3,4,5}}{Vlt_{1,6}} = 0.3 \quad (4.5)$$

として測定を行う。2～5 段目のファンにこの入力を与えることで、次に上下端のファンにどのような入力を与えれば有効な変化角度を得られるかを調べる。

#### 4. 2. 2 上下端のファンへの入力値の検討

上下端のファンへの入力値を変化させ、風洞中央部にどの程度の風向が発生するかを確認し、上下端のファンへの適切な入力値を検討する。各ファンへの入力は表 4.2 に従う。それぞれ 4.5 式に従って中央 4 つのファンに対しては 0.3 の入力を与える。そして、それぞれ上下端のファンへの入力が 1 と -1 を基本として、それぞれの入力を減らしたケースを確認する。sidechange1 から sidechange5 までの 5 つのケースについて、 $x=500\text{mm}$  と  $x=1000\text{mm}$  の位置でどのような気流が得られるかを確認した。ここに示してある数値は最大値を 1 とした時の割合であり、実際に各ファンへ入力する電圧はこの数値に  $V_{1t0}$  を掛け合わせたものである。なお、この測定は定常状態において測定するものであり、測定中に各ファンへの入力値は変化させていない。

本実験においてはそれぞれの入力において、 $V_{1t0} = 4$  とした。各ケースにて測定された平均風速・平均風向の鉛直分布を図 4.6 から図 4.10 に示す。

この測定において、いずれのケースにおいても  $x=500\text{mm}$  の地点における測定の方が、 $x=1000\text{mm}$  における測定よりも角度が大きく出ていることが確認された。また、上端のファンへの入力が大きい場合、 $x=500\text{mm}$  ではそれほどでもないが、 $x=1000\text{mm}$  においては上の方の測定点における風速がかなり大きくなっていることが確認された。

また、下端のファンへの入力を -1 で固定して、上端のファンへの入力を変化させた図 4.6 の sidechange1、図 4.7 の sidechange2、図 4.8 の sidechange3 を比較すると、上端のファンへの入力を小さくするほど、得られる角度成分は大きく、また風速の鉛直分布についても安定する結果が得られた。

一方で、上端のファンへの入力を 1 に固定して、下端のファンへの入力を変化させた図 4.6 の sidechange1、図 4.9 の sidechange4、図 4.10 の sidechange5 を比較した場合、下端のファンへの入力を小さくすると風速の鉛直分布は安定するが、風向は小さくなってしまいうことが確認された。

このことから、風速分布の安定と大きな風向角度を得るためには上端のファンへあまり大きな入力を与えず、逆に下端のファンへの負の入力は大きくした方がいいことが分かった。このケースの中では、sidechange3 で最も良い結果が得られている。

次に、最も良い結果が得られた sidechange3 と基本となる sidechange1 をもとにして、中央 4 つのファンへの入力の検討を行う。



表 4.2 各ケースのファンへの入力値

fan No.	sidechange1	sidechange2	sidechange3	sidechange4	sidechange5
fan(1, :)	1	0.5	0.3	1	1
fan(2, :)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
fan(3, :)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
fan(4, :)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
fan(5, :)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
fan(6, :)	-1	-1	-1	-0.5	-0.3

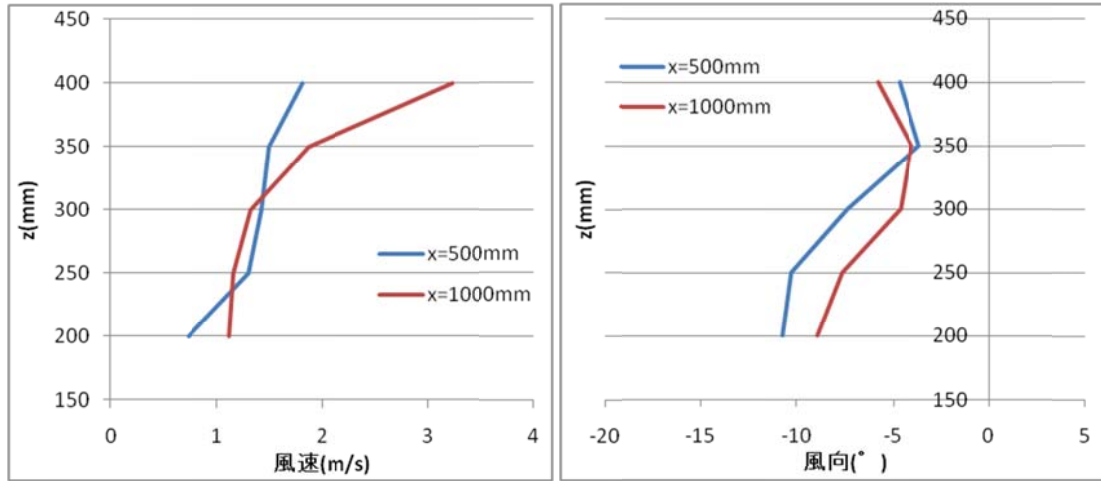


図 4.6 sidechange1 の平均風速・風向鉛直分布

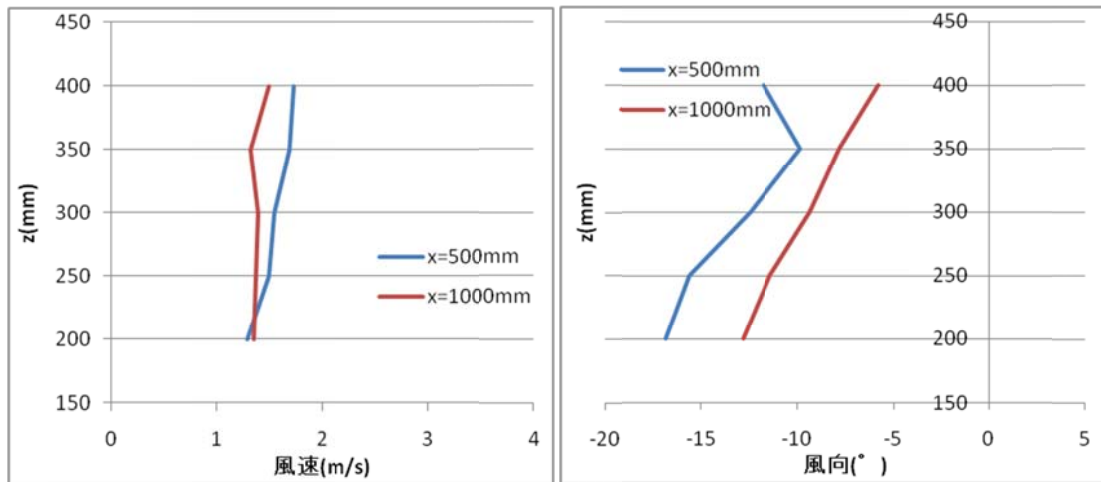


図 4.7 sidechange2 の平均風速・風向鉛直分布

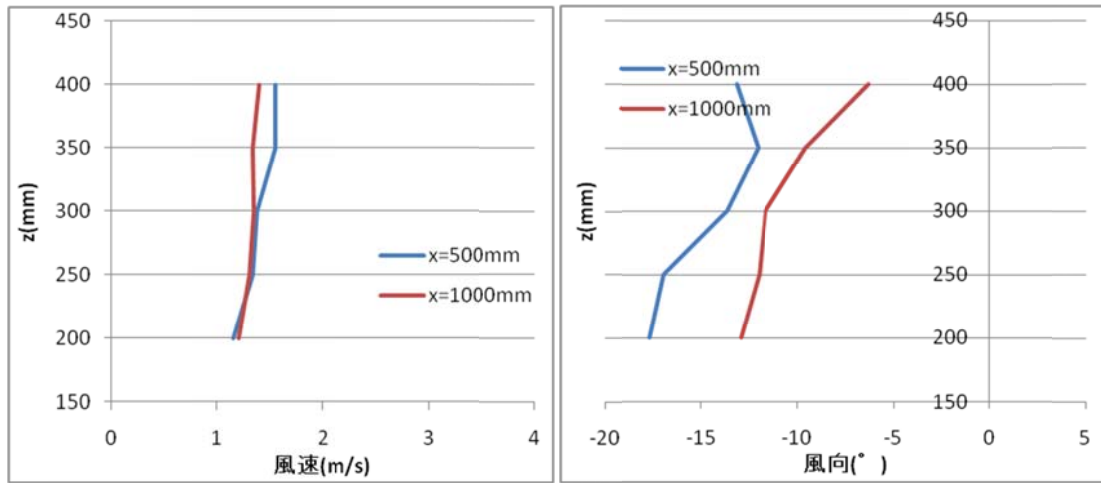


図 4.8 sidechange3 の平均風速・風向鉛直分布

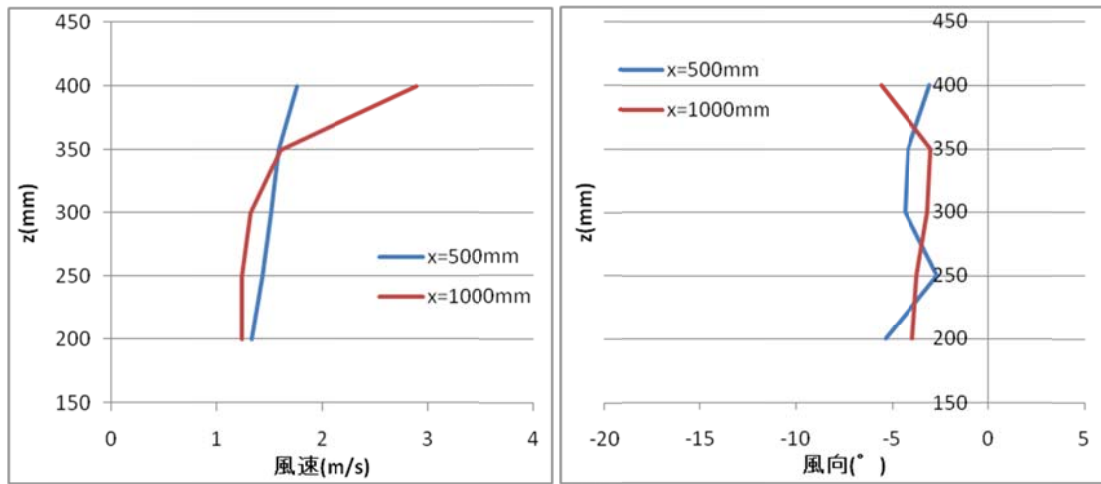


図 4.9 sidechange4 の平均風速・風向鉛直分布

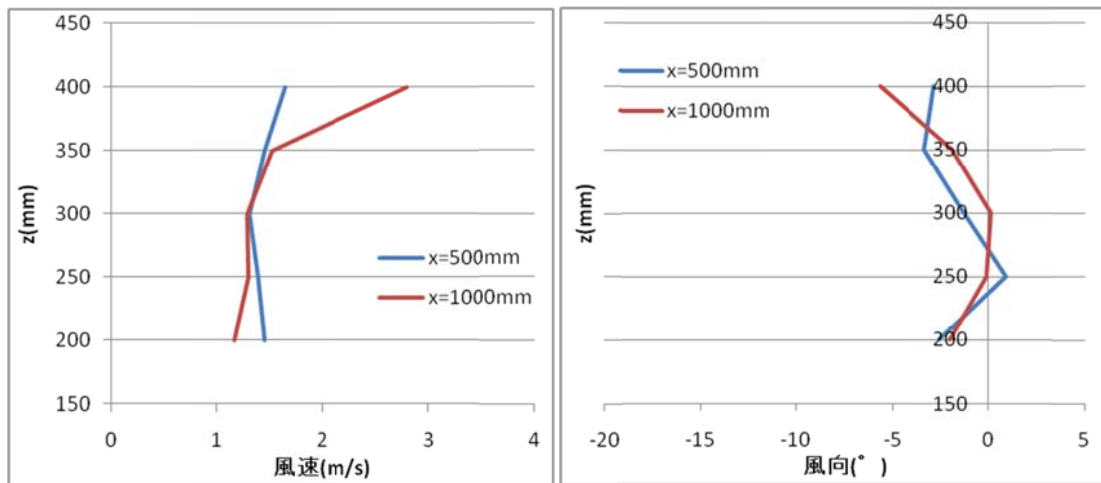


図 4.10 sidechange5 の平均風速・風向鉛直分布

## 4. 3 中央4段のファンに対する入力値の調整

### 4. 3. 1 おおまかな検討

上下端のファンの場合と同様に、中央4つのファンへの適切な入力値を検討する。各ファンへの入力値は表4.3に従う。middle1~5はsidechange1の上下端のファンへの入力に従い、中央4つのファンへの入力を変化させている。また、middle5~8はsidechange3を基本としている。middle9は1列複数ファン風洞において行われた実験における入力値であり、風洞間の比較のためにここで実験を行う。middle1~8については、 $x=500\sim 1000\text{mm}$ の間で100mmごとに6点の位置で $z=200\sim 400\text{mm}$ の範囲でどのような気流が得られるかを確認した。middle9については風が逆流することはないので、 $x=500\text{mm}$ と $x=1000\text{mm}$ の位置において、 $z=50\sim 550\text{mm}$ の範囲で風速・風向の鉛直分布を確認した。なお、ここでは $V/t_0$ は $2v$ と $4v$ の2通りで実験を行った。

各ケースにて測定された平均風速・平均風向の鉛直分布を図4.11から図4.28に示す。また、参考として図4.29に1列複数ファン風洞における測定結果を示す。

表4.3 各ケースのファンへの入力値

fan No.	middle1	middle2	middle3	middle4	middle5	middle6	middle7	middle8	middle9
fan(1, :)	1	1	1	1	1	0.8	0.5	0.3	1
fan(2, :)	0.15	0.25	0.5	0.8	1	0.8	0.5	0.3	0.8
fan(3, :)	0.15	0.25	0.5	0.8	1	0.8	0.5	0.3	0.8
fan(4, :)	0.15	0.25	0.5	0.8	1	0.8	0.5	0.3	0.8
fan(5, :)	0.15	0.25	0.5	0.8	1	0.8	0.5	0.3	0.8
fan(6, :)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0

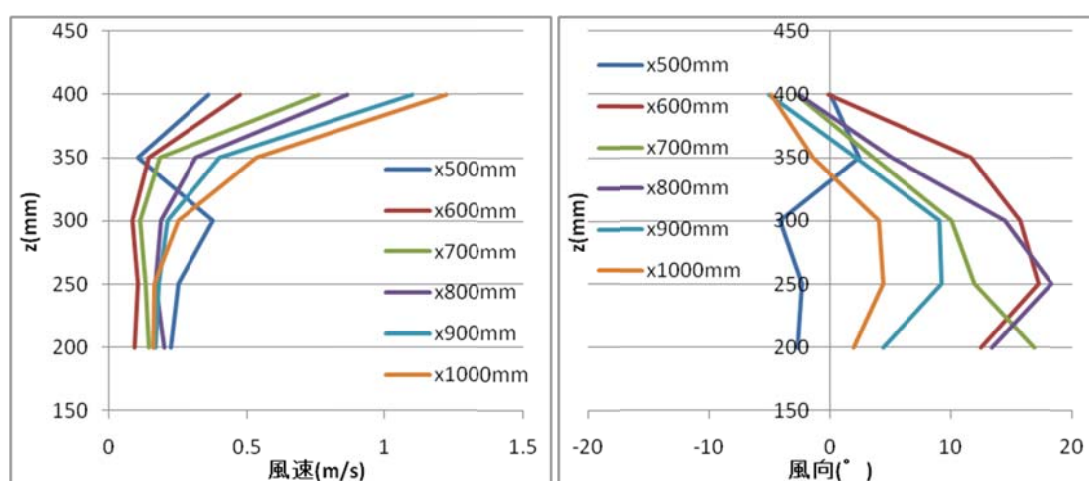


図4.11 2v 入力\_middle1 の平均風速・風向鉛直分布

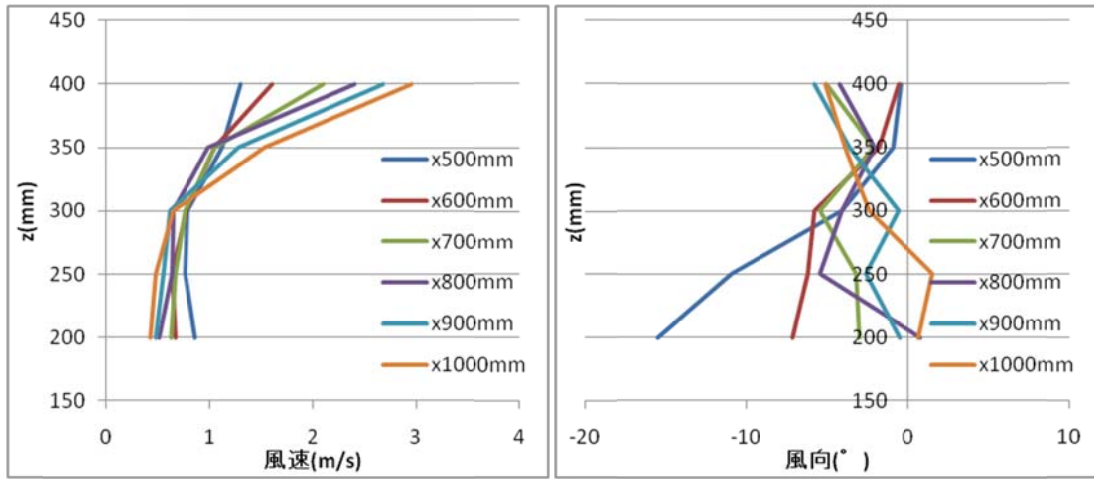


図 4.12 4v 入力\_middle1 の平均風速・風向鉛直分布

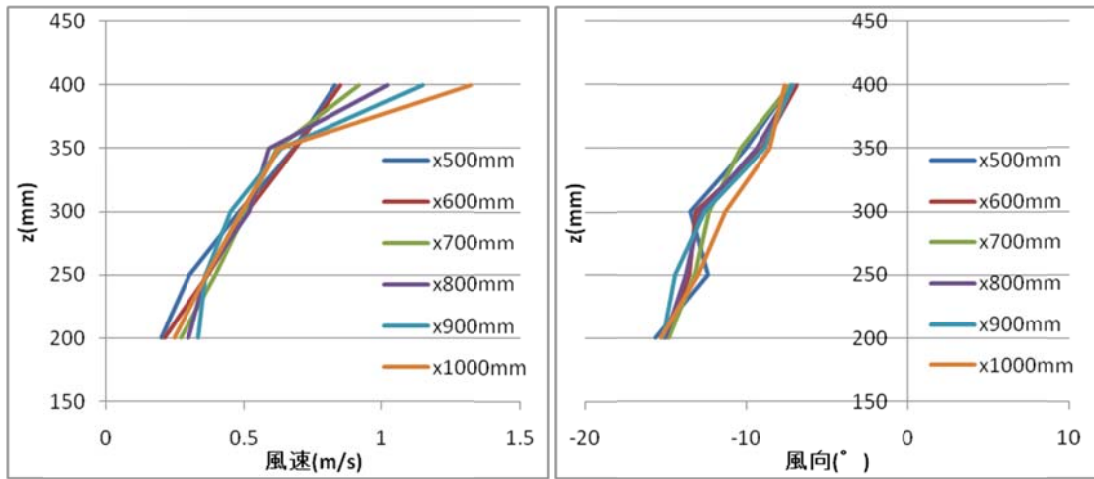


図 4.13 2v 入力\_middle2 の平均風速・風向鉛直分布

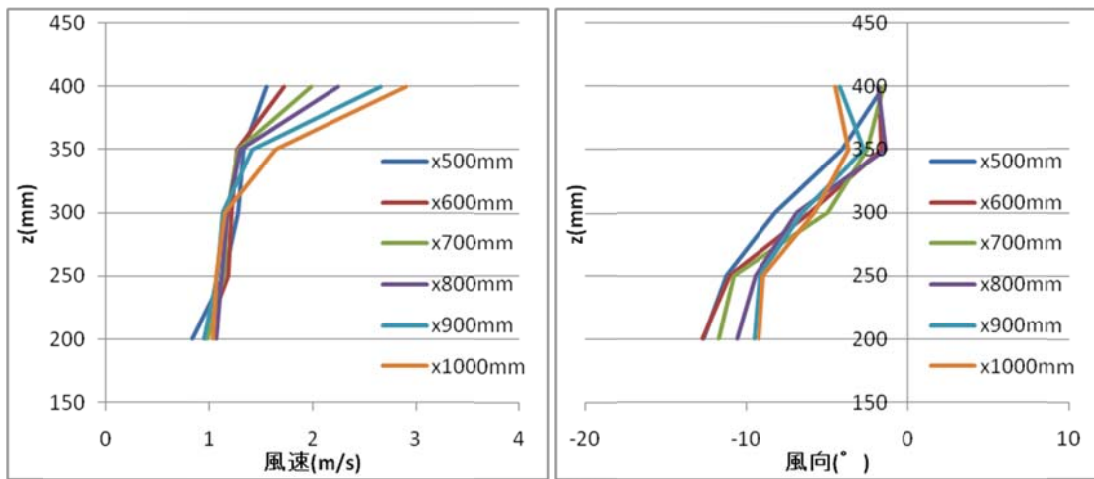


図 4.14 4v 入力\_middle2 の平均風速・風向鉛直分布

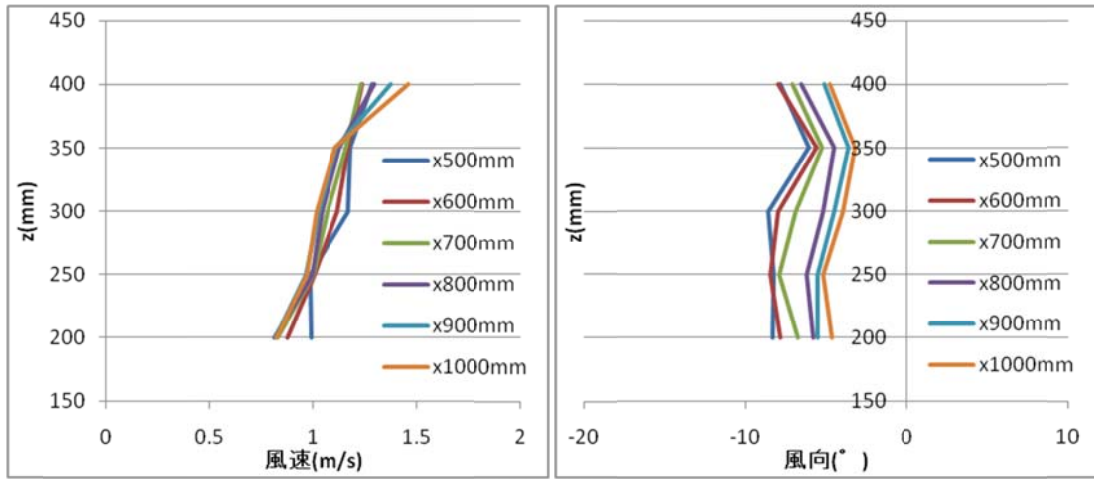


図 4.15 2v 入力\_middle3 の平均風速・風向鉛直分布

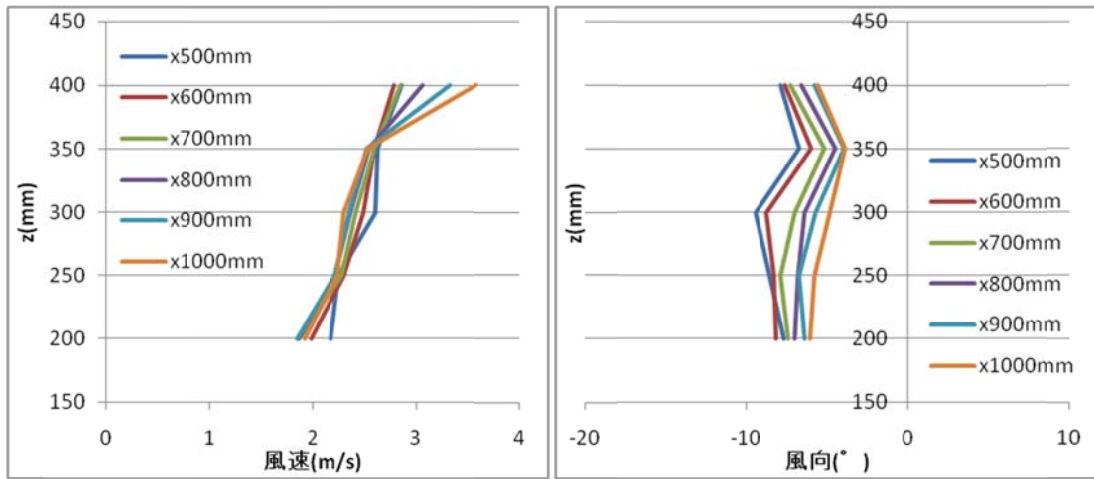


図 4.16 4v 入力\_middle3 の平均風速・風向鉛直分布

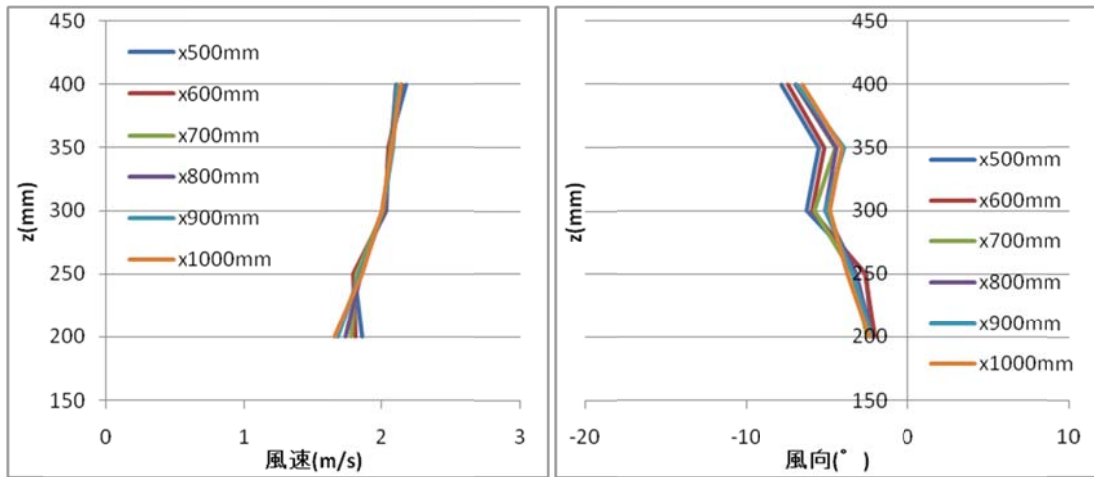


図 4.17 2v 入力\_middle4 の平均風速・風向鉛直分布

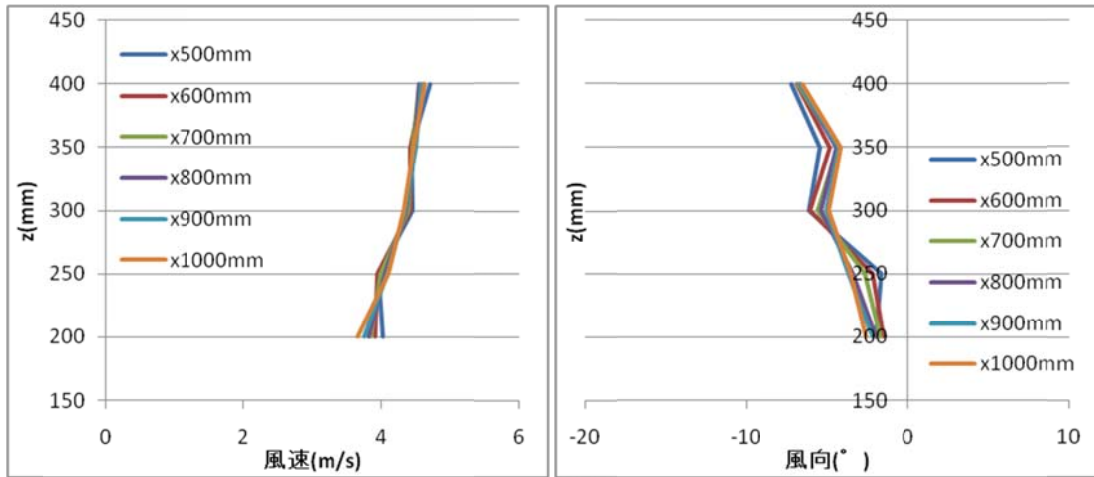


図 4.18 4v 入力\_middle4 の平均風速・風向鉛直分布

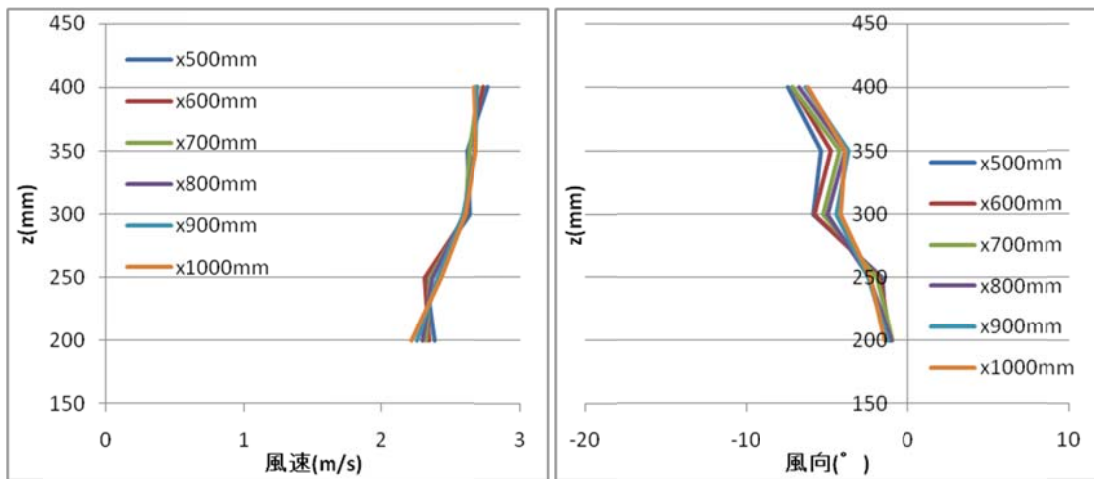


図 4.19 2v 入力\_middle5 の平均風速・風向鉛直分布

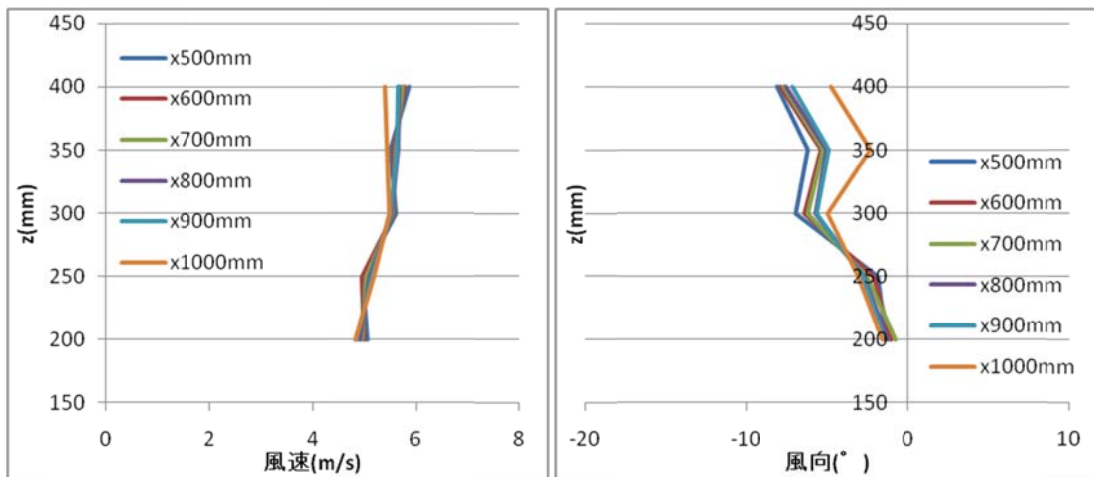


図 4.20 4v 入力\_middle5 の平均風速・風向鉛直分布

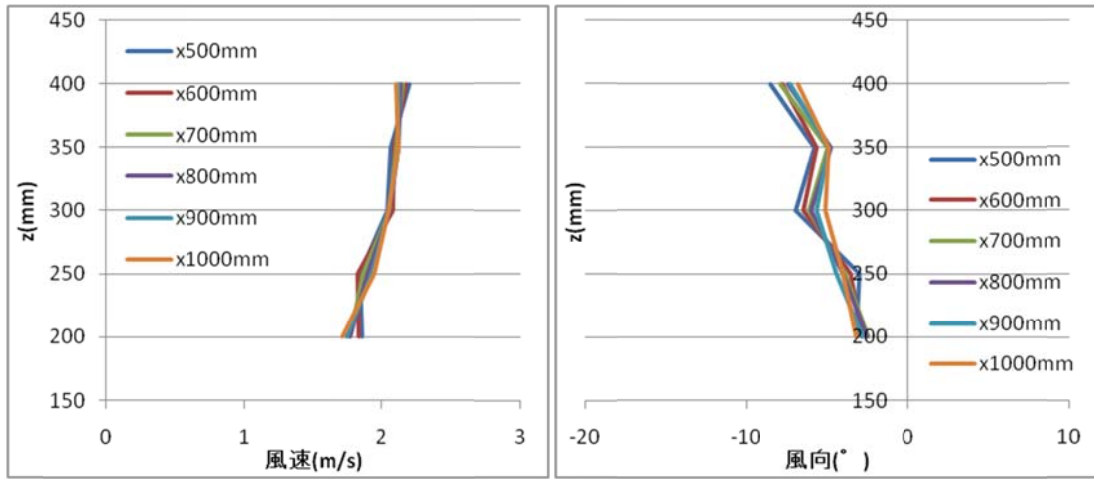


図 4.21 2v 入力\_middle6 の平均風速・風向鉛直分布

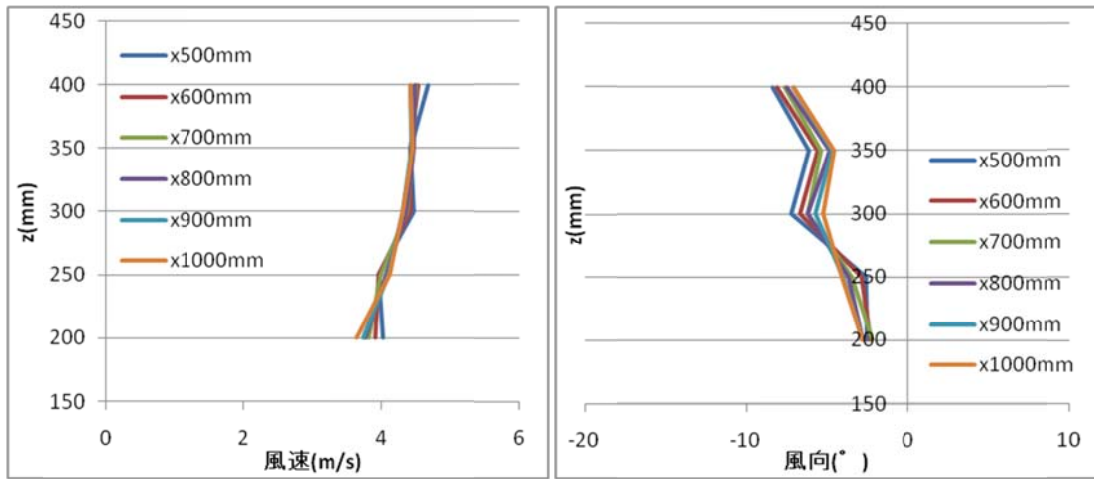


図 4.22 4v 入力\_middle6 の平均風速・風向鉛直分布

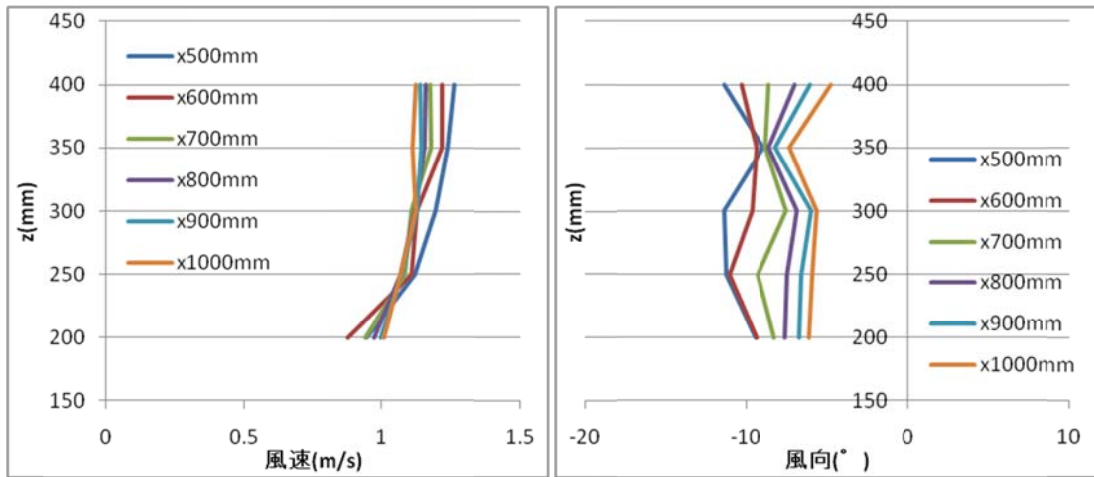


図 4.23 2v 入力\_middle7 の平均風速・風向鉛直分布

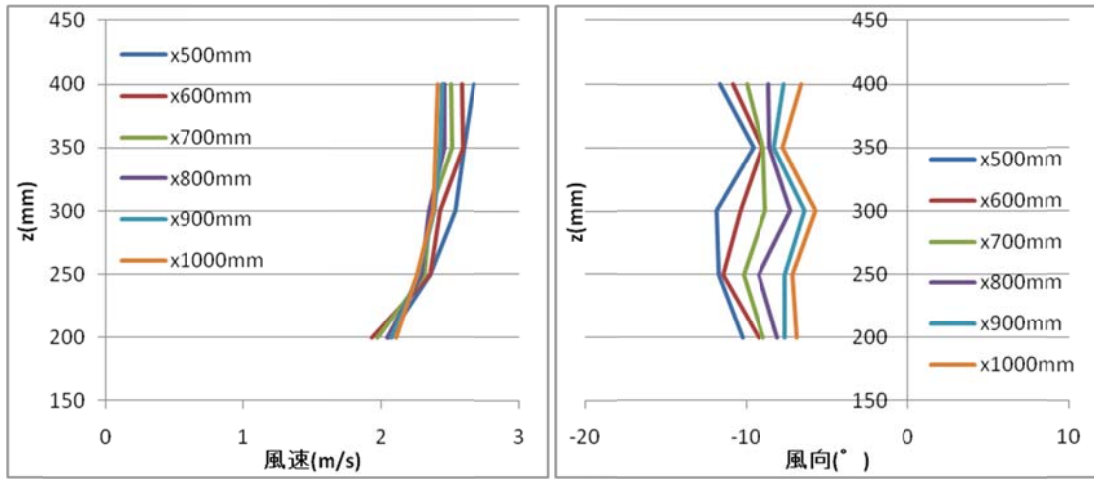


図 4.24 4v 入力\_middle7 の平均風速・風向鉛直分布

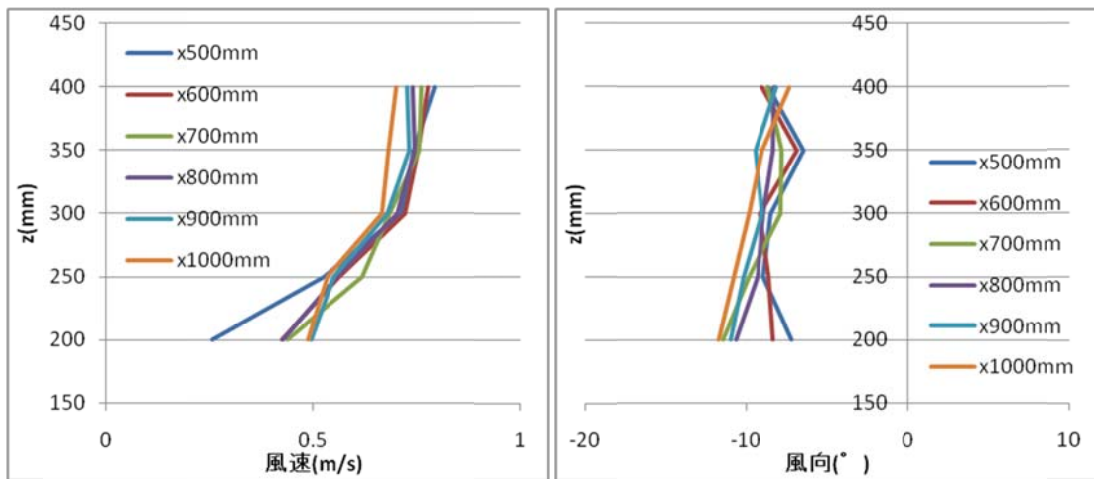


図 4.25 2v 入力\_middle8 の平均風速・風向鉛直分布

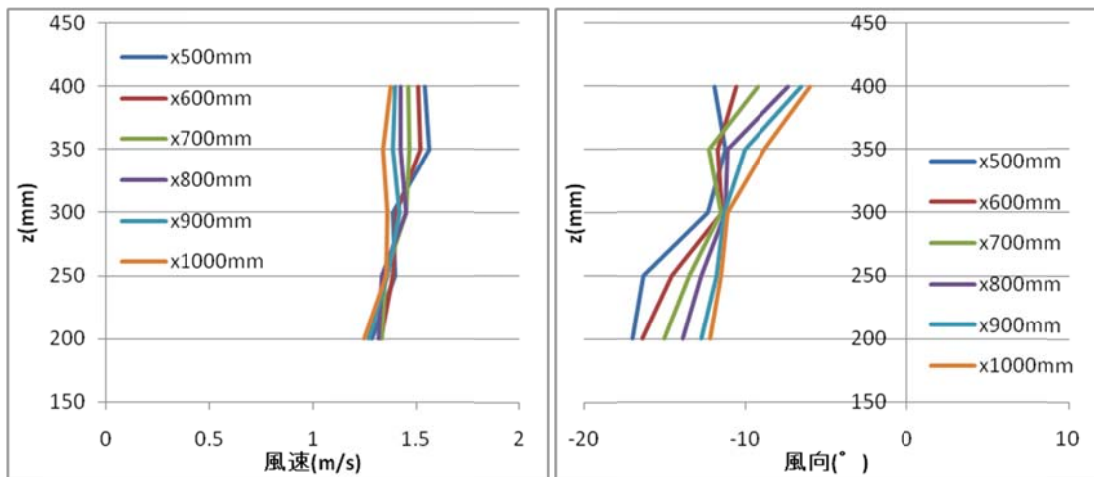


図 4.26 4v 入力\_middle8 の平均風速・風向鉛直分布



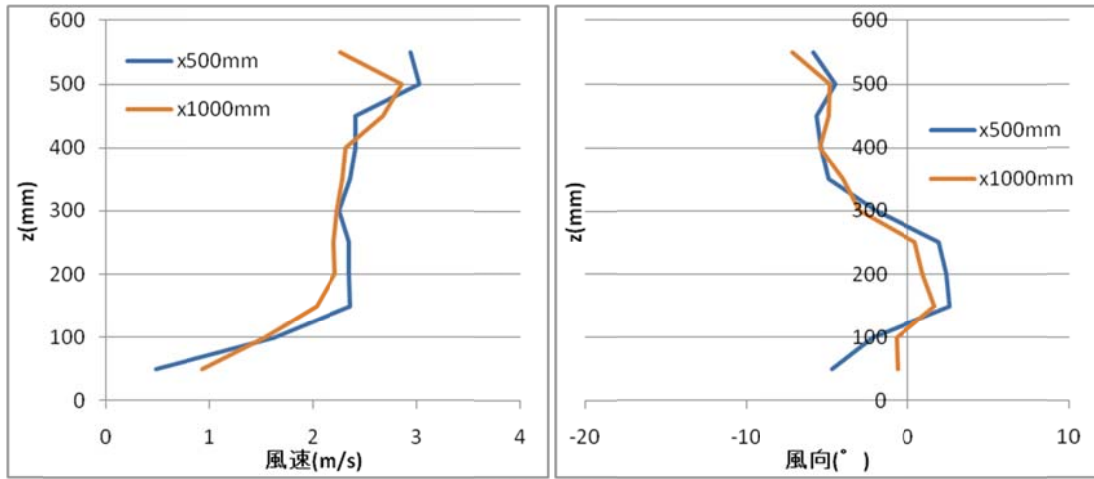


図 4.27 2v 入力\_middle9 の平均風速・風向鉛直分布

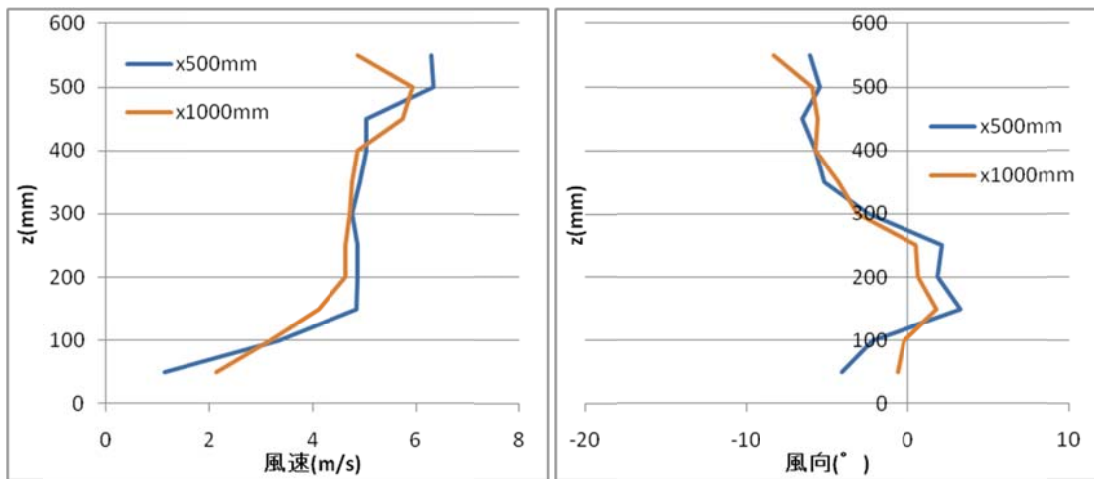


図 4.28 4v 入力\_middle9 の平均風速・風向鉛直分布

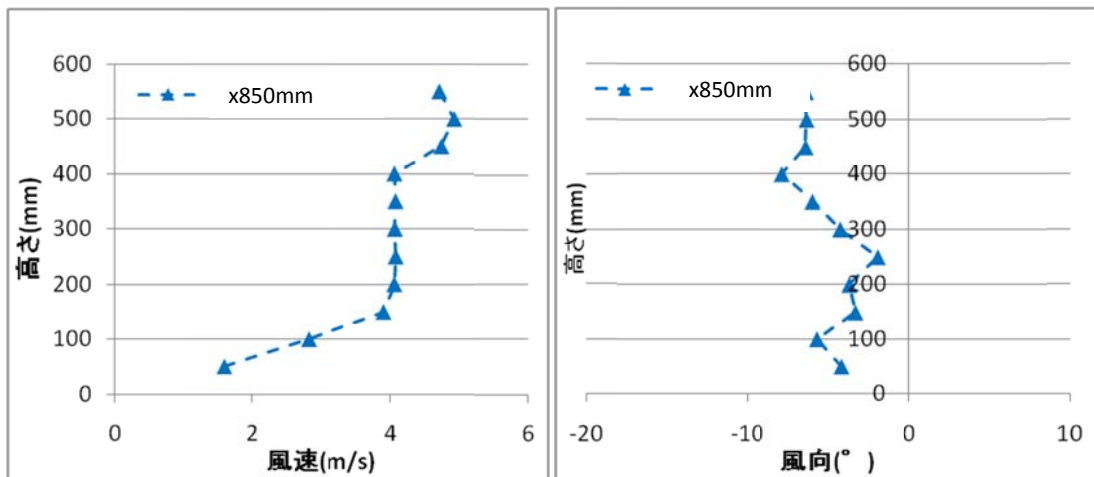


図 4.29 1 列複数ファン風洞における平均風速・風向鉛直分布

これらの測定結果について、検討を行う。まず、middle1～middle5 で、middle1 及び middle2 は大きい場合には 10 度を超える風向が出ているものの、風速はかなり小さくて風向があまり安定せず、かつ入力値は 4.4 式を満たしてもいないので、結果の信頼性も低いといえる。その他については、中央 4 段への入力を大きくするほど、風速の分布は安定していく一方で、得られる風向角度は小さくなっている。ここでは、middle3 の  $x=600\text{mm}$  付近が、ある程度風速が安定しつつ、9 度近い大きな風向変化が得られるケースであるとして、次に微調整を行うことにする。

次に、middle5～middle8 の中では、中央 4 段への入力を小さくするほど風速は安定せず、逆に大きな風向が得られるようになる様子が確認できる。ここでは、今回の計測の中でかなり大きな計測値が得られながらも、風速がある程度安定している middle8 の  $x=600\text{mm}$  付近のものがよさそうであるため、これについて微調整を行っていく。

また、middle9 については、風速はある程度安定しているが、他に比べて角度の成分が小さく、扱うには不十分であるといえる。また、middle9 で  $V_{lt0}=4$  の入力のもは 1 列複数ファン風洞における入力値とまったく同じものであるが、図 4.28、図 4.29 を見比べる限り、風速成分は似通っているものの、風向成分は 1 列の時に比べて、+側にまでせり出してしまっていることが確認できる。よって、1 列の時との実験の比較という点でも、middle9 は適していないといえる。そこで、今回の実験で風向成分で近い値が得られた middle5 の  $x=900\text{mm}$  付近のデータを改良することで、1 列複数ファン風洞における実験値と近い値を再現することにする。

#### 4. 3. 2 各ケースの細調整

先の実験にて確認した middle3 middle5 middle8 の3つのケースについて、後の風圧測定実験の際に模型周辺で風速の分布に大きな差が出ないように、また、つくられる風向の大きさを扱いやすいものにするために、ファンへの入力値を細かく変えて、調整を行う。調整する範囲は模型を設置する基準点周りとし、middle3 と middle8 については  $x=500\sim 700\text{mm}$ 、 $z=250\sim 350\text{mm}$  の範囲、middle5 については  $x=800\sim 1000\text{mm}$ 、 $z=250\text{mm}\sim 350\text{mm}$  の範囲とする。この内側における風速の測定値を、基準点を中心として差が 5%以内に収まることを目標とした。

それぞれの調整した時の入力電圧を表 4.4 から表 4.6 に示す。測定結果を比較しながら、順に計測していった。なお、それぞれのケースは、 $V1t0=4$  で統一している。また、調整する前とした後の平均風速・風向のグラフを図 4.30 から図 4.32 に示す。図上の点線は基準点から 5%のラインを示している。

表 4.4 middle3 を元に調整した各ケースの入力電圧

fan No.	middle3	middle3_1	middle3_2	middle3_3	middle3_4	middle3_5
fan(1,:)	1	1	1	1	1	1
fan(2,:)	0.5	0.475	0.45	0.45	0.43	0.41
fan(3,:)	0.5	0.475	0.45	0.48	0.46	0.46
fan(4,:)	0.5	0.55	0.575	0.52	0.55	0.56
fan(5,:)	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
fan(6,:)	-1	-1	-1	-1	-1	-1

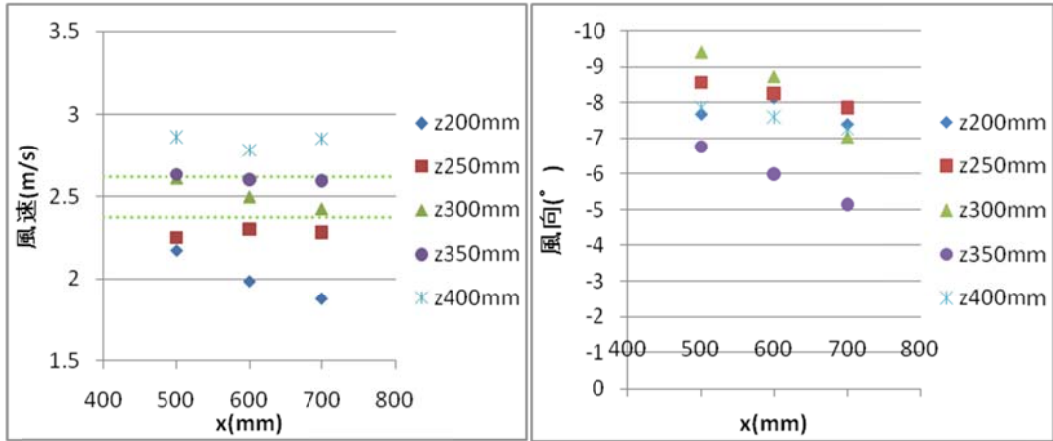
表 4.5 middle5 を元に調整した各ケースの入力電圧

fan No.	middle5	middle5_1	middle5_2	middle5_3	middle5_4	middle5_5
fan(1,:)	0.5	0.5	0.45	0.45	0.45	0.45
fan(2,:)	0.5	0.475	0.4275	0.45	0.45	0.45
fan(3,:)	0.5	0.475	0.4275	0.5	0.48	0.47
fan(4,:)	0.5	0.55	0.525	0.5	0.51	0.52
fan(5,:)	0.5	0.6	0.55	0.53	0.53	0.53
fan(6,:)	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5

表 4.6 middle8 を元に調整した各ケースの入力電圧

fan No.	middle8	middle8_1	middle8_2	middle8_3	middle8_4	middle8_5	middle8_6	middle8_7	middle8_8
fan(1,:)	0.3	0.27	0.26	0.26	0.3	0.27	0.26	0.27	0.27
fan(2,:)	0.3	0.27	0.26	0.26	0.3	0.28	0.27	0.27	0.27
fan(3,:)	0.3	0.28	0.27	0.27	0.32	0.31	0.3	0.31	0.3
fan(4,:)	0.3	0.31	0.325	0.34	0.36	0.36	0.36	0.34	0.33
fan(5,:)	0.3	0.33	0.33	0.35	0.4	0.4	0.4	0.36	0.34
fan(6,:)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

調整前(middle3)



調整後(middle3\_5)

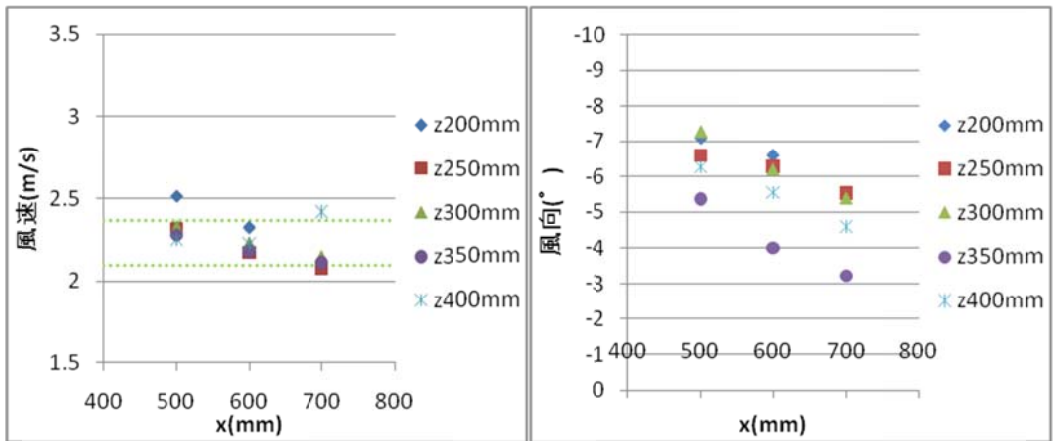
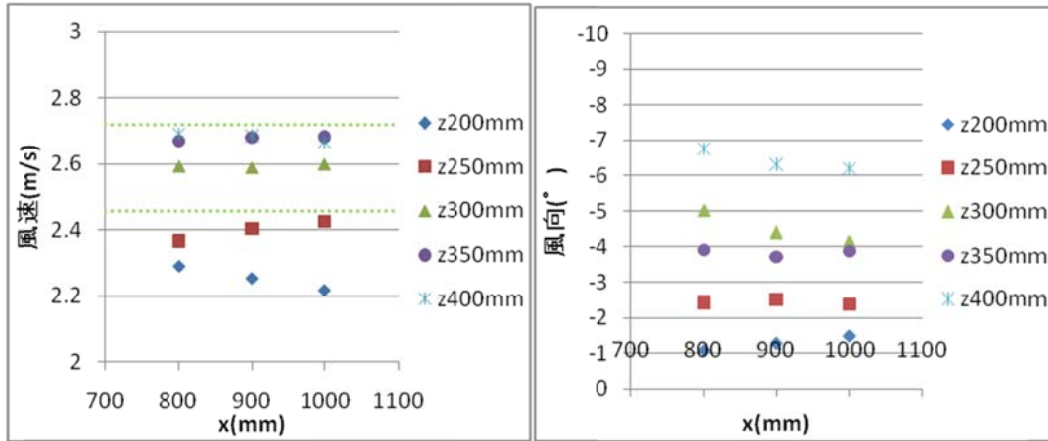


図 4.30 middle3 の風速・風向分布

調整前(middle5)



調整後(middle5\_5)

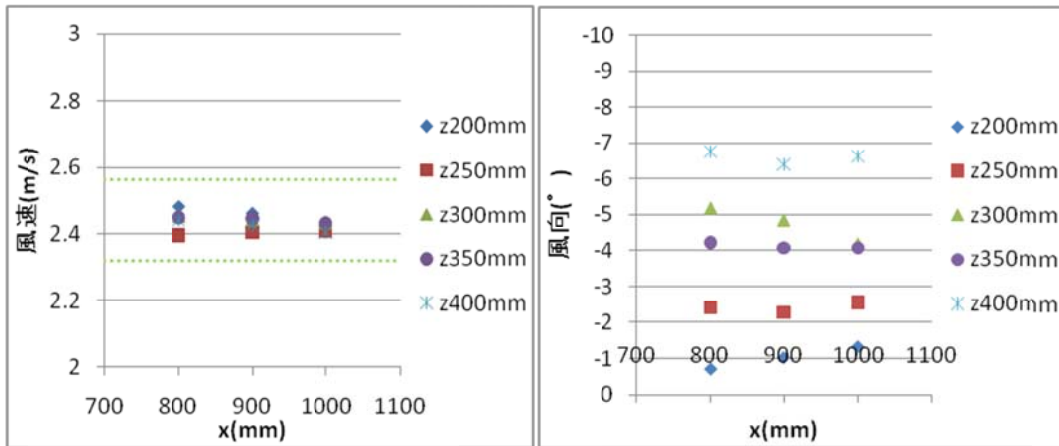
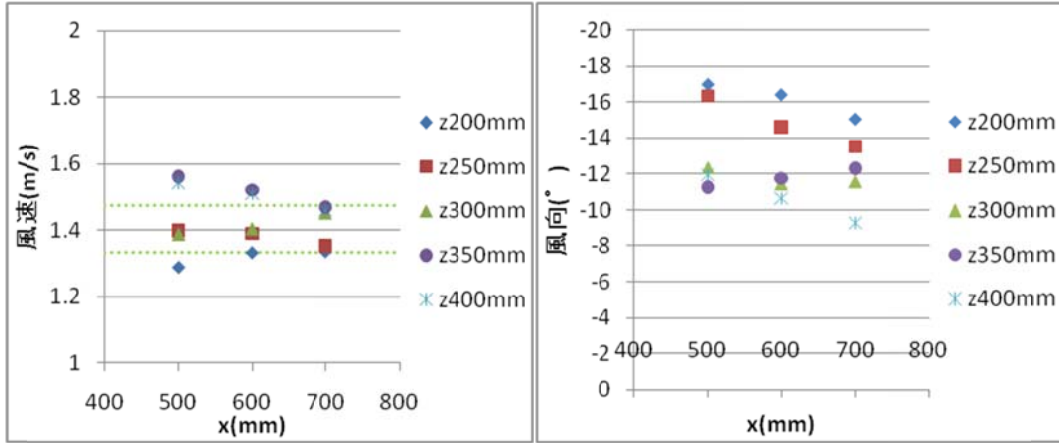


図 4.31 middle5 の風速・風向分布

調整前(middle8)



調整後(middle8\_8)

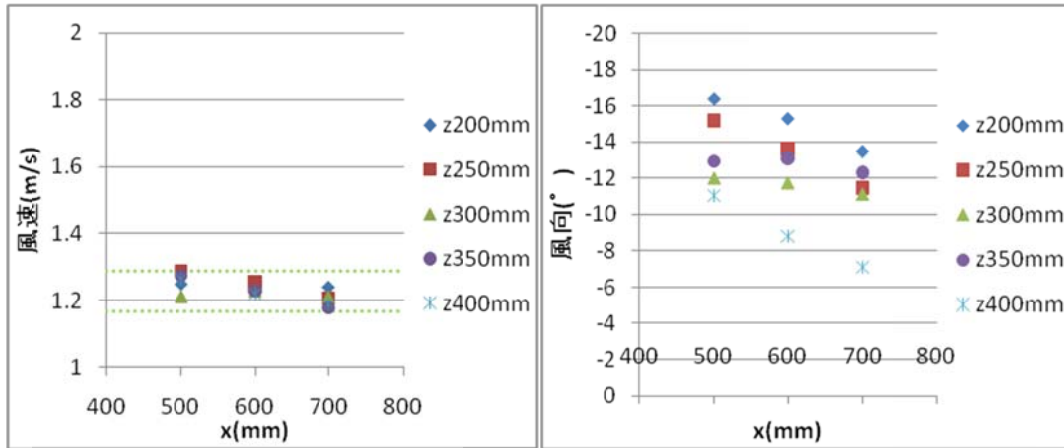


図 4.32 middle8 の風速・風向分布

以上の検討によって、middle3\_5、middle5\_5、middle8\_8に至った時点で風速の差を基準点を中心として5%の範囲に収めることが出来た。また、検討を重ねるごとに風向角度が0度に近づいていくことは避けられなかったが、最終的にmiddle3\_5の基準点で約7度、middle5\_5の基準点で約5度、middle8\_8の基準点で約10度、の風向が得られることを確認した。これらの気流は下向きの気流であるDownであるので、そこからファンへの入力を対称に変化させてUpの状態にすることで、おおよそ2倍の風向変化、すなわち、middle3\_5を元にしたもので約14度、middle5\_5を元にしたもので約10度、middle8\_8を元にしたもので約20度の変化角度が最大で得られることが予測される。

また、middle5\_5では中央部で約5度の風向変化が得られているが、これは1列複数ファン風洞にて行われた実験による値とほぼ一致する。また、測定の基準点も1列複数ファン風洞の時は $(x, z)=(850, 300)$ の点であったが、middle5\_5の基準点も $(x, z)=(900, 300)$ と、近い場所になっている。これらの条件より、この気流を元に作成した風向変化下における後の実験の結果によって、1列複数ファン風洞との比較を詳細に行うことができるといえる。

これらの結果を用いて、非定常な風向変化をもった気流データを作成する。ここで、middle3\_5を元にする場合を、概ねの変化角度をから、今後str7と呼ぶことにする。同様に、middle5\_5を元にしたものをstr5、middle8\_8を元にしたものをstr10と呼ぶ。

## 4. 4 非定常風向変化気流の作成

### 4. 4. 1 作成にあたっての基本事項

作成するデータは、それぞれ測定場所付近で、鉛直方向に角度を持たずに安定した気流を生む定常状態である Neutral、下方向に向きながら定常状態にある Down、逆に上向きの定常状態である Up の 3 通りの状態間を遷移させる。これまでに、約 5 度の傾きをもつ str5、約 7 度の傾きをもつ str7、約 10 度の傾きをもつ str10 の 3 つのパターンで Down の気流を作成した。また、Up はちょうど Down と逆の関係にあるので、Down とは対称的な入力を与えればよい。また、Neutral については、2.1 式から適切な入力値を決定した。str7 を例に変化の与える様子を表 4.7 に示す。Neutral では変化時の安定のため、上下端のファンに入力を与えていない。

以降の実験において、作成するデータは、おおよそその変化角度からなる気流の番号と変化する状態の順番で表わす（例：Neutral → Up → Down と変化する str10 の気流では NUD10 となる）。また、その後に、変化にかかる時間を並べることで、測定ケースの名称とする。

また、それぞれのケースは最初に 0 から 2 秒で Neutral の状態になるように入力電圧を与える。また、状態が変化するタイミングはファンの回転開始から 15 秒後に最初の変化を、35 秒後に次の変化を開始するようにする。

表 4.7 風向変化作成手順 (NDU7)

fan No.	Neutral	→	Down	→	Up
fan(1, :)	0		1		-1
fan(2, :)	0.381		0.41		0.6
fan(3, :)	0.381		0.46		0.56
fan(4, :)	0.381		0.56		0.46
fan(5, :)	0.381		0.6		0.41
fan(6, :)	0		-1		1

2sec
15sec
35sec



#### 4. 4. 2 測定結果

気流の作成では、str5、str7、str10 について、比較的長い時間をかけて変化させる場合と短い時間で変化させる場合で検討した。ゆっくりした変化を 10 秒、短時間での変化を 2 秒で考える。変化時間 2 秒は 1 列複数ファン風洞における変化時間の限界\*3-4 であり、3 列複数ファン風洞においても、安定した制御を行う上ではこれより短い変化時間は困難であると考えられる。それぞれ状態の変化の過程は Neutral → Down → Up の順で、得られる風速が約 2m/s になるように  $V_{1t0}$  を決めた。

ここでは、状態間の変化を行う際に、風速が変化しないように注意して検討を行った。最終的に求められた気流について、NDU の順序で 2 秒で変化するものと 10 秒で変化するものについて、図 4.33 から図 4.44 に測定された時刻歴データと各ファンへの入力値の時刻歴データを示す。

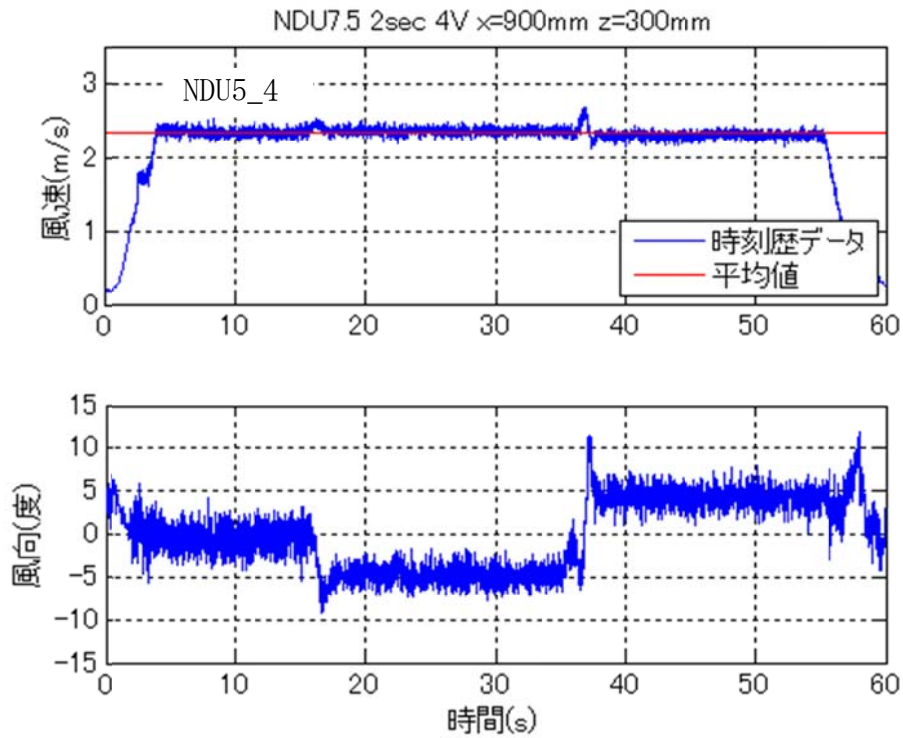


図 4.33 NDU5 で 2 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

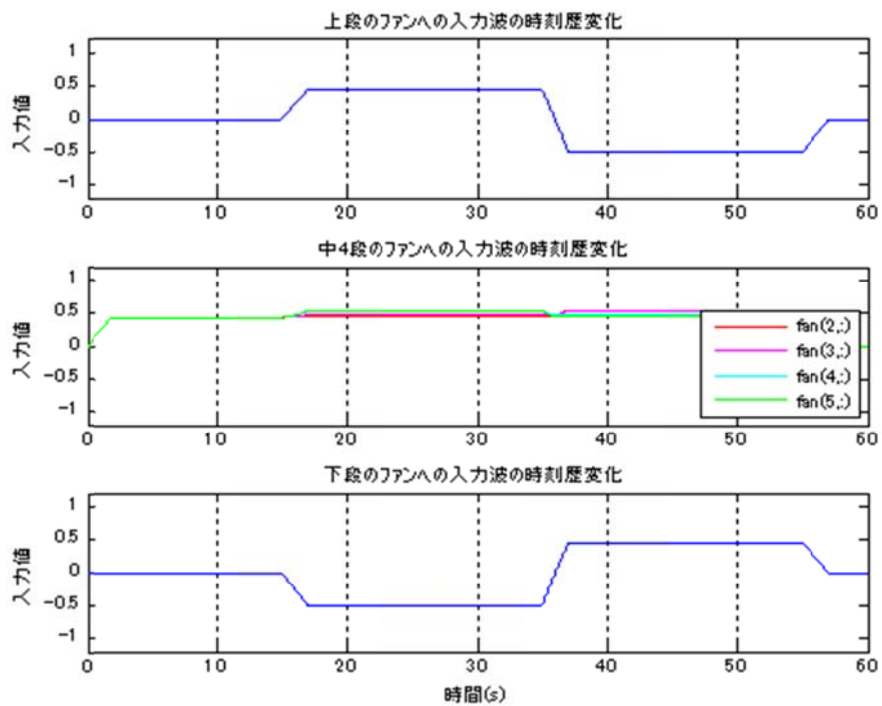


図 4.34 NDU5 で 2 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

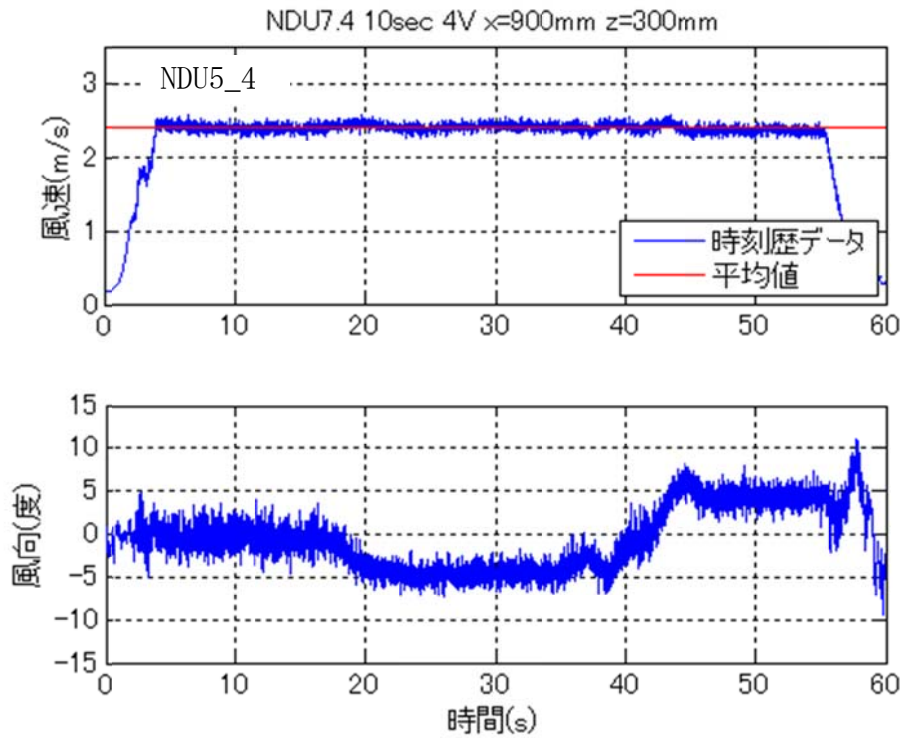


図 4.35 NDU5 で 10 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

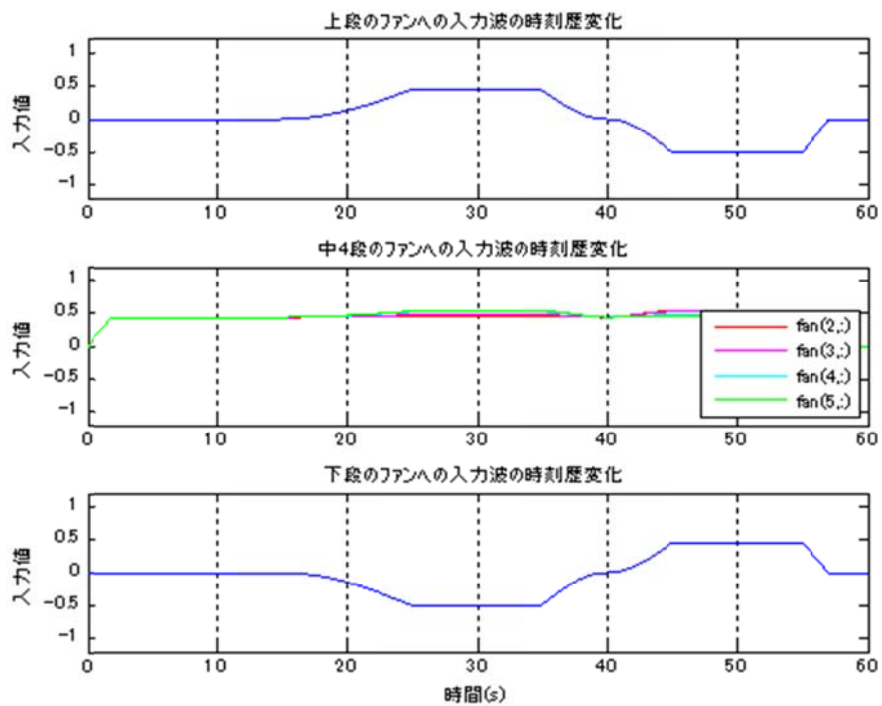


図 4.36 NDU5 で 10 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

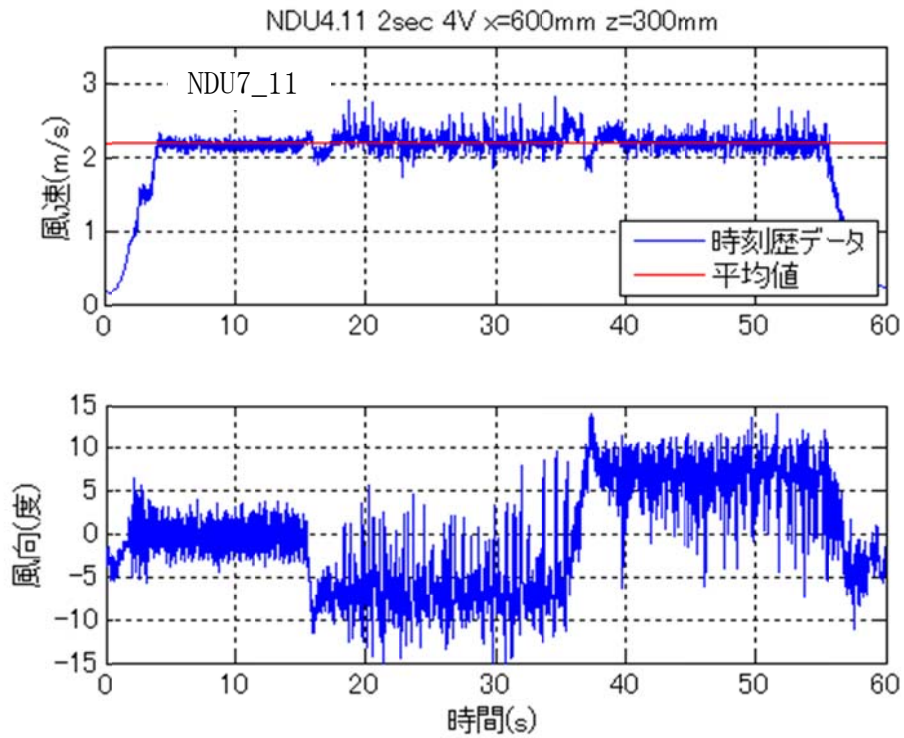


図 4.37 NDU7 で 2 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

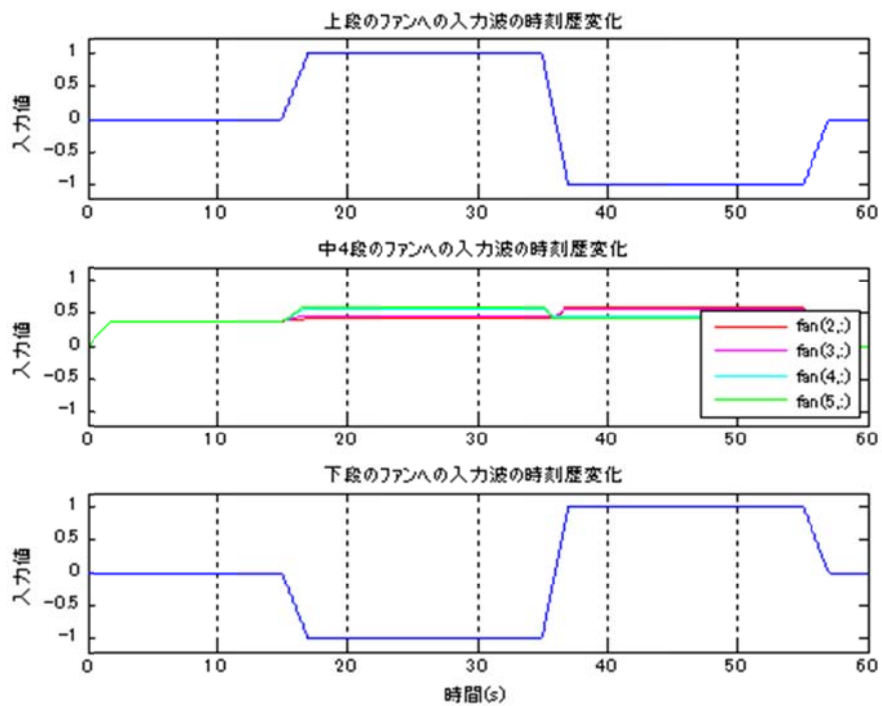


図 4.38 NDU7 で 2 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

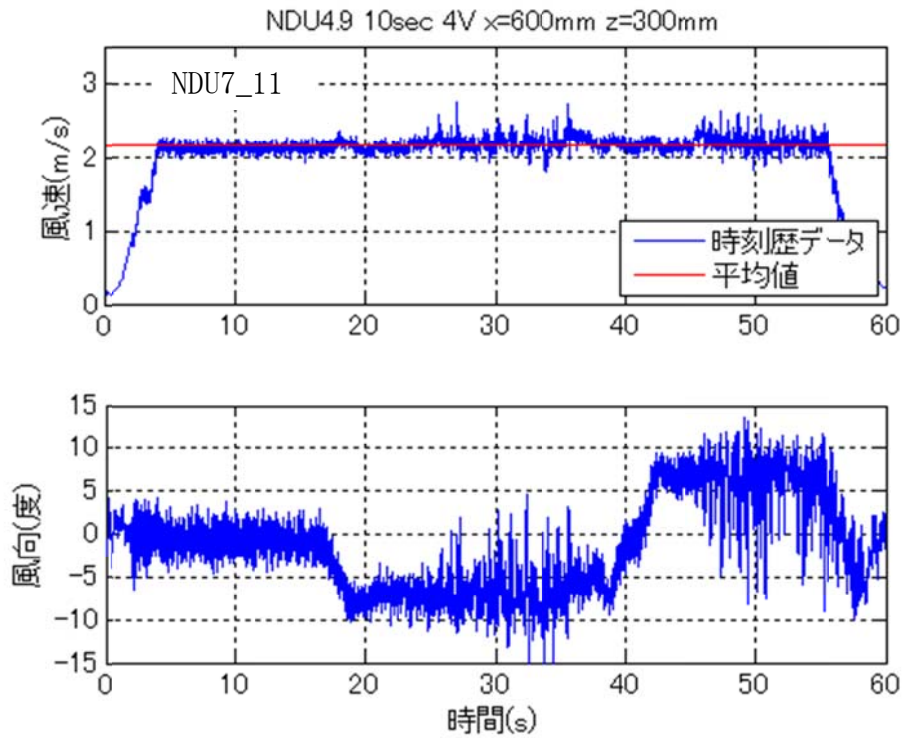


図 4.39 NDU7 で 10 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

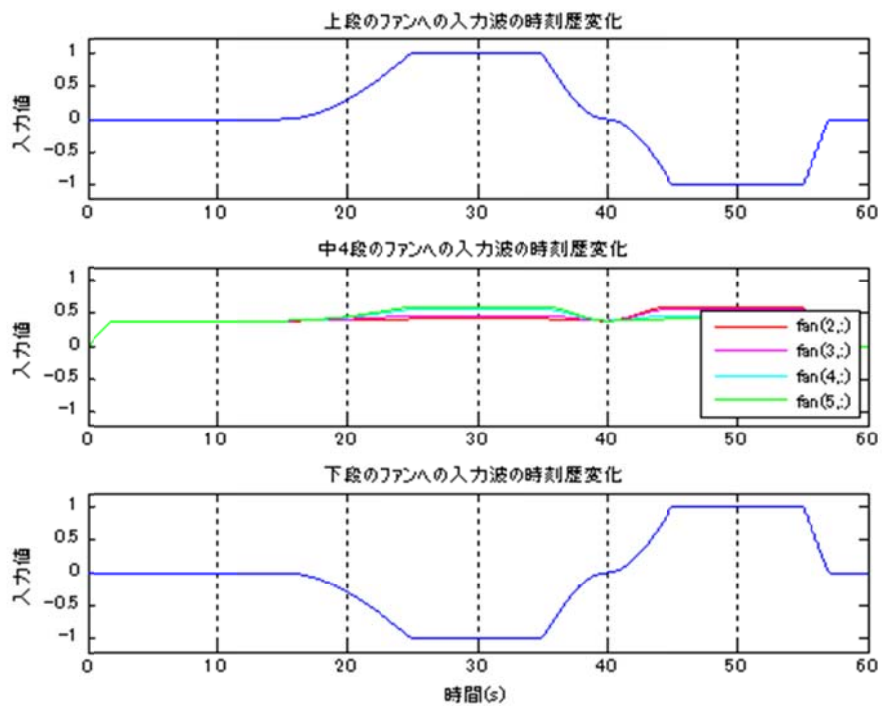


図 4.40 NDU7 で 10 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

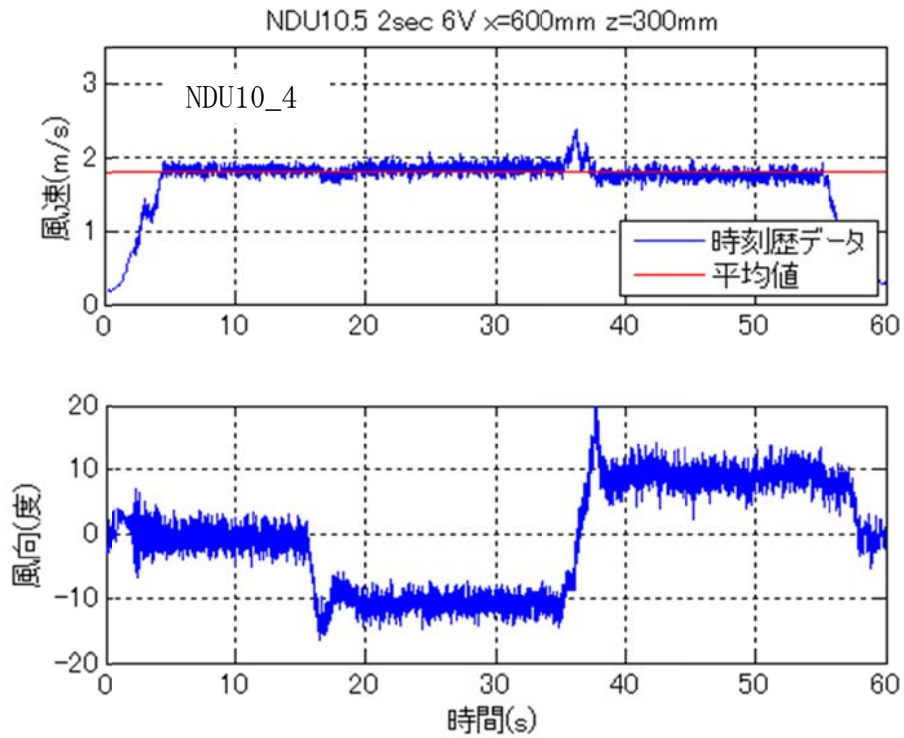


図 4. 41 NDU10 で 2 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

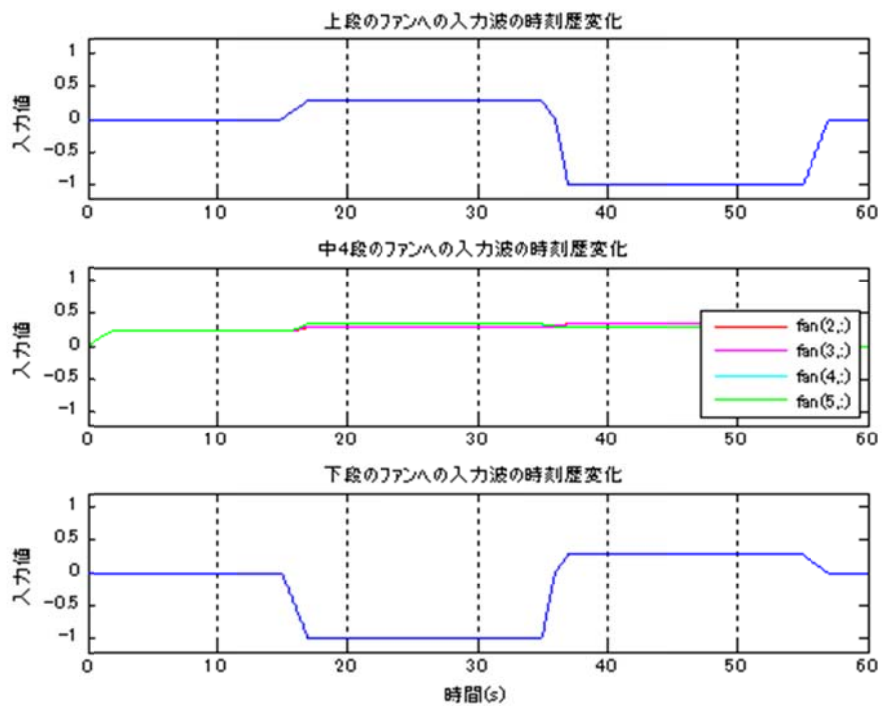


図 4. 42 NDU10 で 2 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

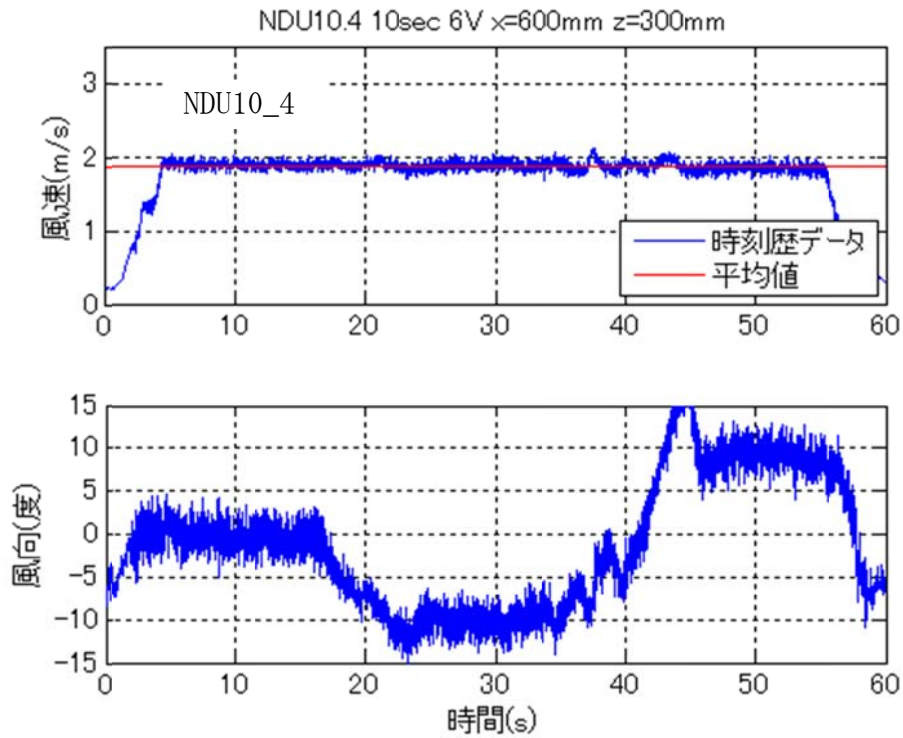


図 4.43 NDU10 で 10 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

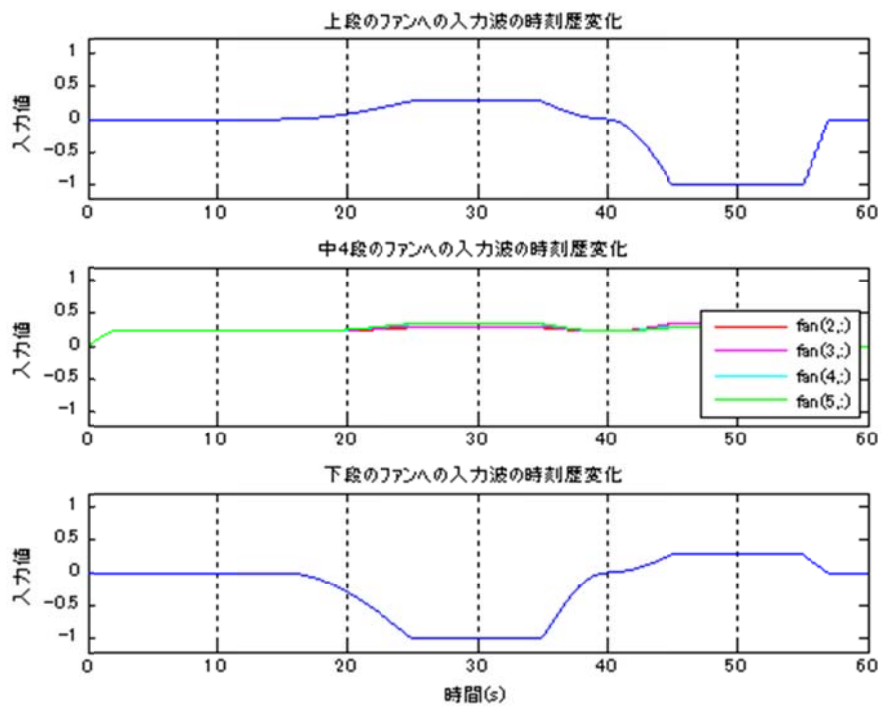


図 4.44 NDU10 で 10 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

本実験による検討において、風速が変化しないようになるべく留意したが、短時間の変化における測定では、変化時に若干の風速の上昇が確認された。また、風向が変化する時に、短時間で変化した場合には風向のオーバーシュート現象が確認された。ただし、str10 の非定常変化の場合には、10 秒で変化した場合にもオーバーシュートを起こしていることが確認できた。

以上の実験によって、風向変化角を持つ気流を作成できた。作成した気流を表 4.8 にまとめる。ここにある気流は非定常に風向が変化するであり、以降の実験ではここで作成した気流を用いて実験を行っていく。

表 4.8 作成気流

	Vlto (V)	平均風速 (m/s)	風向(°)			最大変化角度 (°)	変化時間 (sec)
			N	D	U		
NDU5	4	2.43	-0.67	-4.67	4.36	9.03	2,4,6,8,10
NDU7	4	2.21	-0.66	-6.84	6.98	13.82	2,4,6,8,10
NDU10	6	1.87	-0.84	-10.32	8.75	19.07	2,4,6,8,10
NUD5	4	2.40	-0.68	4.39	-4.62	-9.01	2,4,6,8,10
NUD7	4	2.16	-0.63	7.38	-6.43	-13.81	2,4,6,8,10
NUD10	6	1.88	-0.59	8.71	-10.49	-19.20	2,4,6,8,10



## 第五章

### 風洞内静圧分布の測定実験

本来、風圧測定実験においては、5.1 式のように、測定したい圧力測定位置に対して基準となる静圧孔を風洞内の適切な場所に設け、その間の差圧という形で表現される。

$$p = p' - p_s \quad (5.1)$$

- p : 測定圧力 (Pa)
- p' : 表面圧力 (Pa)
- p<sub>s</sub> : 基準静圧 (Pa)

基準静圧は圧力を測定する模型などの設置場所と同じ大きさの静圧でなければならない。一般的な境界層風洞などにおいては、模型などの設置場所の近くの壁面に静圧測定孔を設けるか、ピトー管によって静圧を測定する。それには前提として、流れ方向に対して垂直に切った断面では同じ静圧となっている、すなわち、風洞内の静圧は1次元的に捉えることができることがあげられる(図 5.1)。

しかし、4章で作成したような気流の下で実験を行う場合、鉛直方向にファンの回転数がそれぞれ異なっていて、なおかつ風速もそれぞれ異なっている。このような場合、同一平面内で静圧の値が同じであるという保証がないため、単純に同一平面に基準静圧孔を備えればよいというようにはならない。

よって、本章では3列複数ファン風洞において、非定常変化時にどのような静圧場が風洞内に生まれているのかを確認する。まず、風速成分が非定常に増減する場合の圧力の様子を確認し、次に5章で作成した気流を用いて、非定常に風向が変化する場合の静圧の分布の様子を確認する。それらの結果を元に、適切な基準静圧孔の位置や模型の設置方法を検討する。

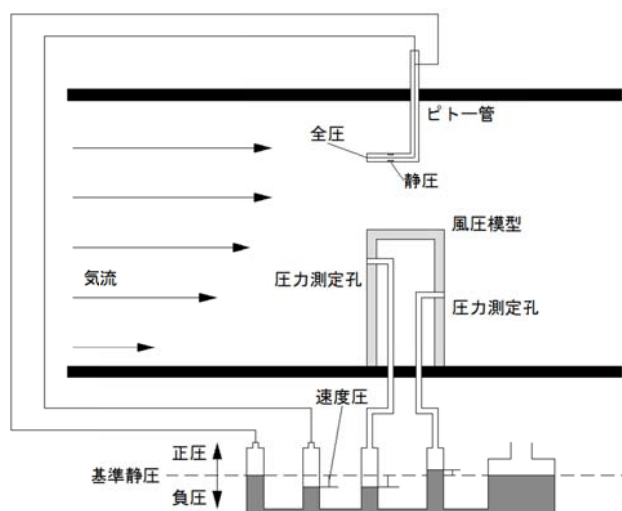


図 5.1 一般的な基準圧の在り方

## 5. 1 静圧測定手法

### 5. 1. 1 圧力測定機器の概要

圧力測定は図 5. 2 のように機器を接続して行う。測定は ch. 1～ch. 60 までの計 60 点で同時に測定が可能であり、圧力測定と同時に外部からの信号を測定することができる。5. 1 式に用いる測定の基準圧として、風洞内に設置したピトー管により測定した静圧か、風洞外部にて測定した大気圧かを選択することができる。また、圧力と同時にピトー管によって風速を測定することが可能である。ピトー管による風速の測定は次式に従う。

$$U(t) = \sqrt{\frac{2 \times (p_0(t) - p_s(t))}{\rho}} \quad (5. 2)$$

$p_0$  : 全圧 (Pa)

$p_s$  : 静圧 (Pa)

しかし、本実験のように風洞内の静圧が安定せず、大きく変化するような場においては、圧力の測定遅れなどが原因となって、正確に風速を測定することは困難である。よって、ここでは外部からの入力として 2, 4 章でも利用した I 型プローブ熱線風速計の抵抗値を与え、その値を校正して風速を求めることにする。

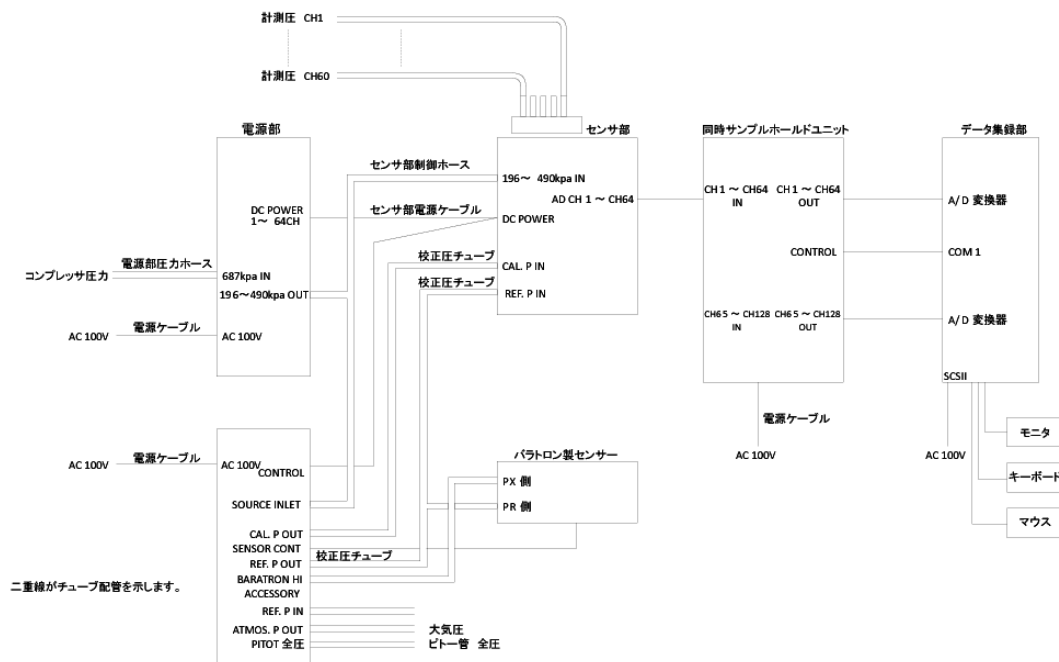


図 5. 2 圧力測定システム図

### 5. 1. 2 風洞内静圧の測定方法

風洞内の静圧を確認するため、**図 5.3** のように風洞の床面、および側面に圧力測定孔を設ける。床面には  $y=300\text{mm}$  の風洞の中心線上に  $x=100\text{mm}\sim 3500\text{mm}$  まで合計 35 点、風洞側面には、前章の実験にて風向の変化が大きく観測された、 $x=500\text{mm}$  地点に  $z=50\text{mm}\sim 550\text{mm}$  まで合計 11 点を設けた。

なお、本計測実験においては代表とするべき静圧は定まらないため、風洞外部にて測定された大気圧を基準としている。また、I 型プローブ熱線風速計を用いて、 $(x, y, z) = (1000, 300, 300)$  の地点で圧力測定と同時に風速を測定する。

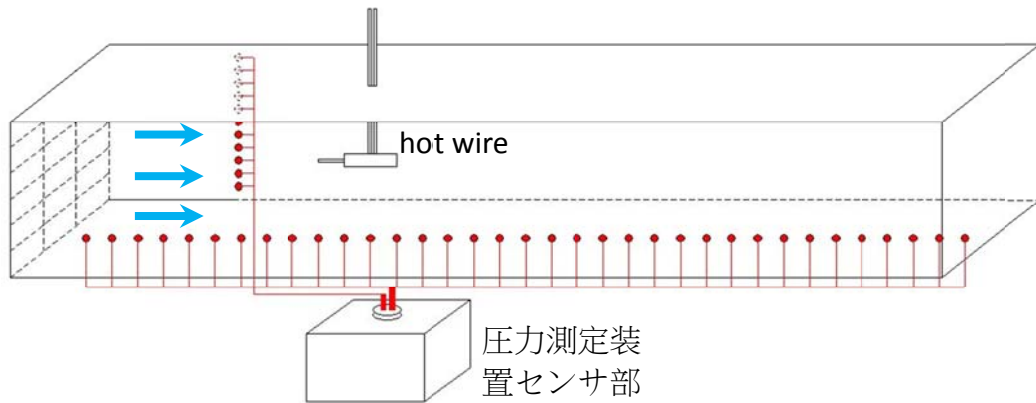


図 5.3 圧力測定孔の設置位置

## 5. 2 風速変化時における風洞内静圧分布

### 5. 2. 1 風洞内の静圧分布の確認

前田等の研究では、吸込み式突風風洞を用いて立ち上がり時間が0.2秒程度の短い突風による物体表面風圧への影響を検討しているが、そこでは正確な差圧判定が困難であることを示し、そのような状況下における実験手法を考察している。3列複数ファン風洞は吹き出し式であり、同様の実験方法をとることはできないが、風洞内の静圧場の把握は変わりなく重要事項である。

ここでは、全てのファンに対して一律に同じ変化を与えることで、風洞内で風速が非定常に大きく変化する場合の圧力の変化の様子をとらえる。変化にかかる時間による違いをみるため、2秒から10秒まで2秒刻みでの変化時間を与える入力、及び、ファンの応答性の限界という意味で、入力上では0秒で変化する入力波を与える。いずれの変化時間に対しても、測定開始から10秒後に入力電圧を1次線形に増やし、30秒後に1次線形に減らすように入力している。また、上昇幅による違いをみるために、入力電圧は0.5vから4vまで0.5v刻みで与えた。なお、計測時間は40秒で、サンプリング周波数は1000Hz、それぞれ3回測定してアンサンブル平均を行っている。また、グラフを見やすくするために10個のデータからの時間平均を行った。

図5.4から図5.27に10秒、2秒、及び0秒で入力波が変化する場合のそれぞれの測定結果を示す。それぞれの図は、上段に各ファンへの入力電圧の時刻歴、中段に測定された風速を、下段に代表される風洞床面の測定孔の圧力時刻歴を示している。

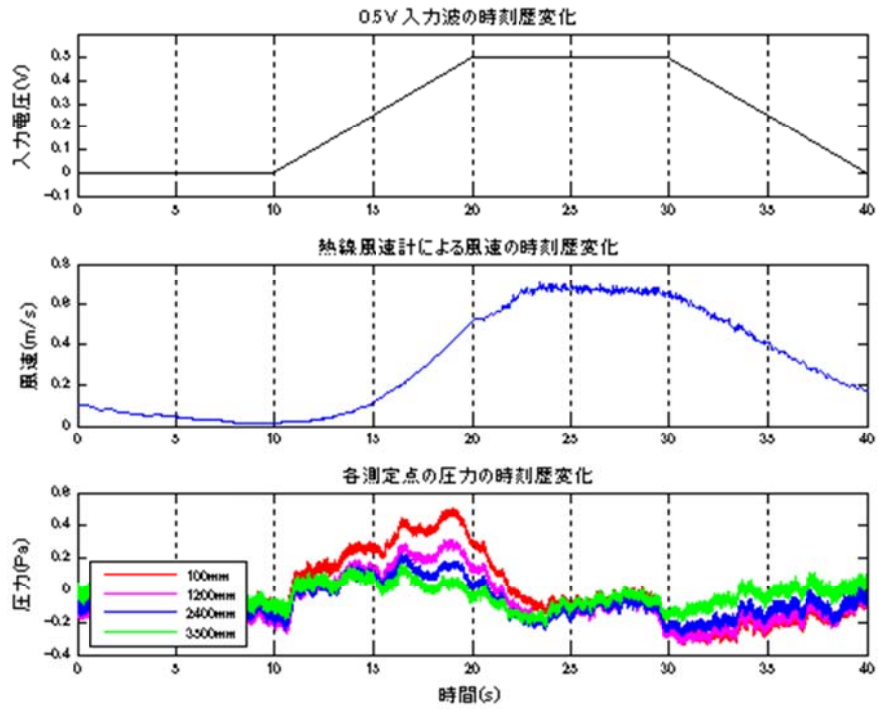


図 5.4 静圧測定結果\_0.5v 入力\_10 秒変化

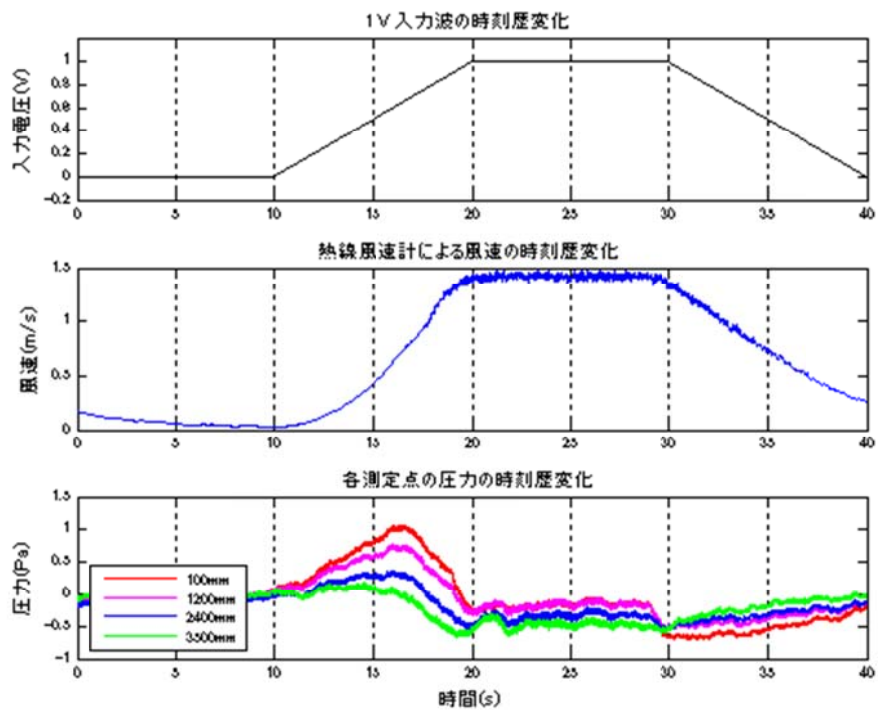


図 5.5 静圧測定結果\_1v 入力\_10 秒変化

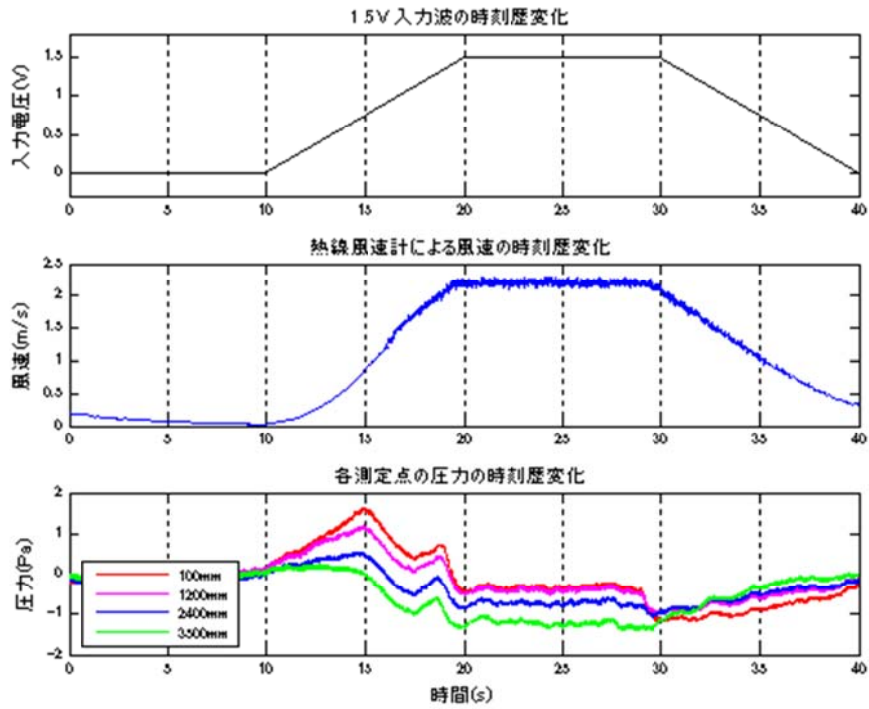


図 5.6 静圧測定結果\_1.5v 入力\_10 秒変化

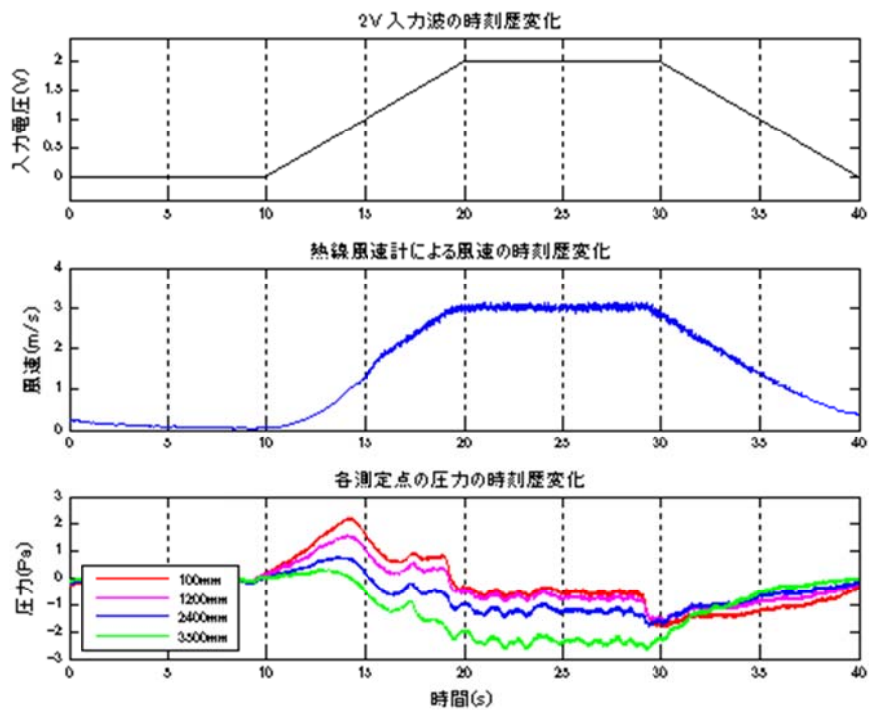


図 5.7 静圧測定結果\_2v 入力\_10 秒変化

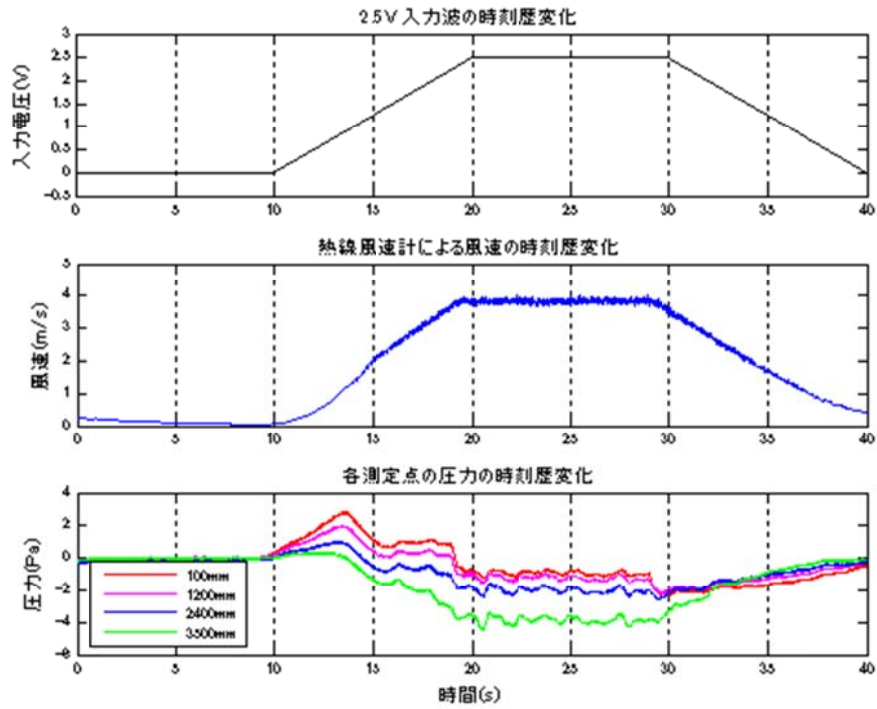


図 5.8 静圧測定結果\_2.5v 入力\_10 秒変化

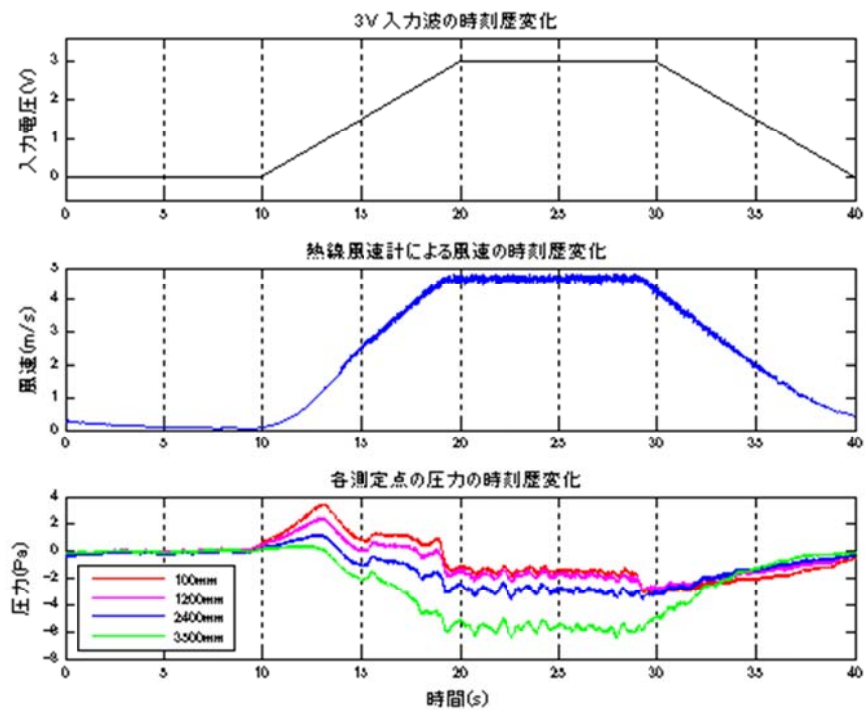


図 5.9 静圧測定結果\_3v 入力\_10 秒変化



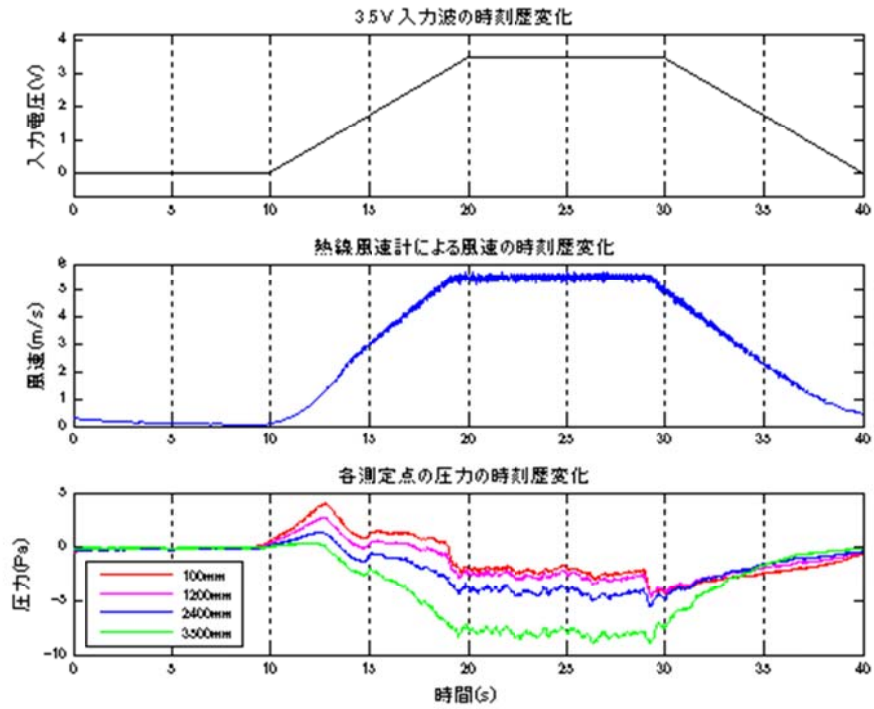


図 5.10 静圧測定結果\_3.5v 入力\_10 秒変化

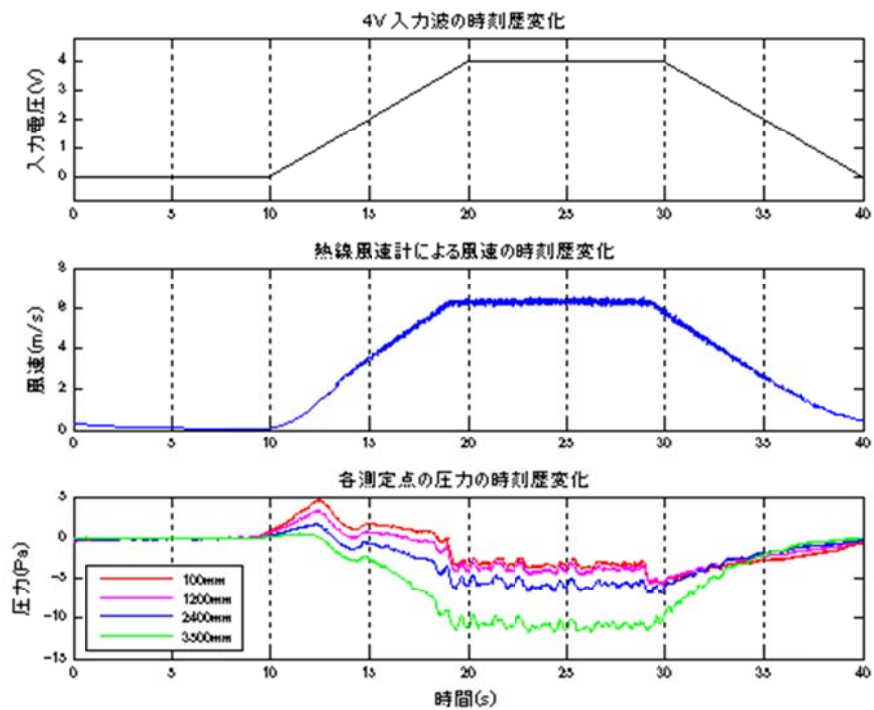


図 5.11 静圧測定結果\_4v 入力\_10 秒変化

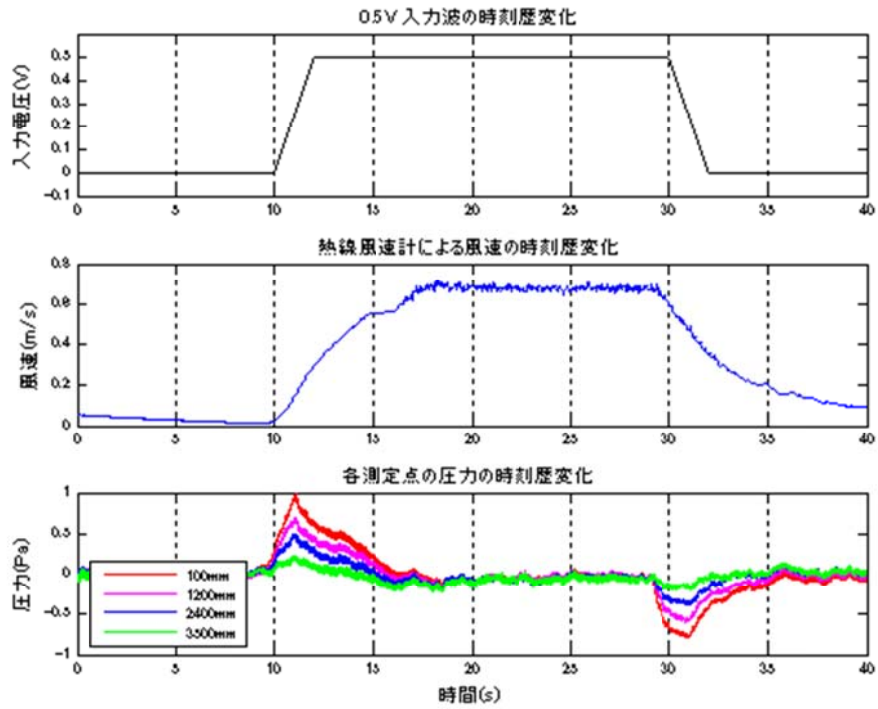


図 5.12 静圧測定結果\_0.5v 入力\_2 秒変化

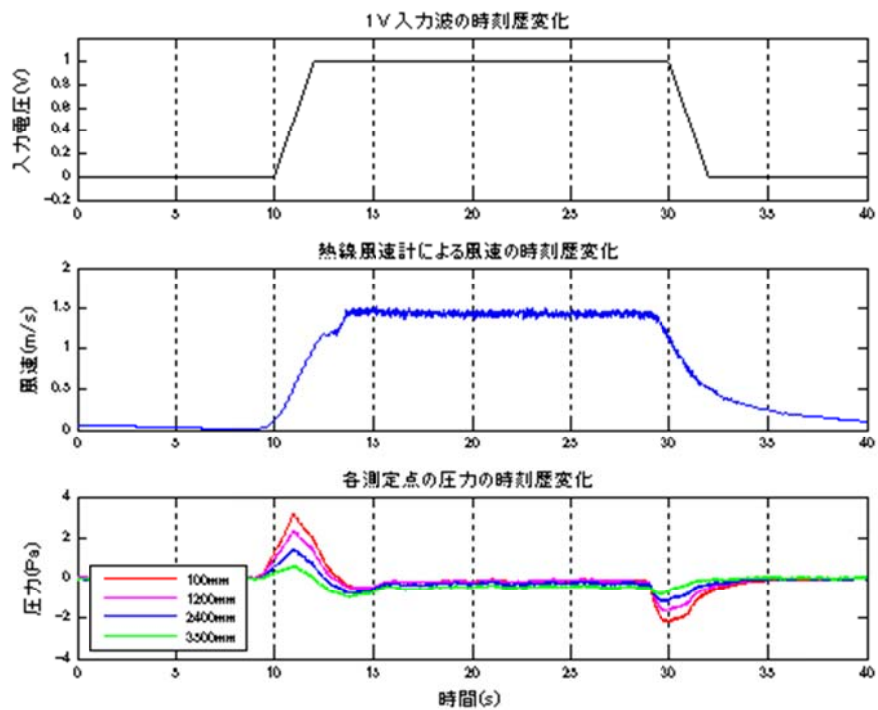


図 5.13 静圧測定結果\_1v 入力\_2 秒変化

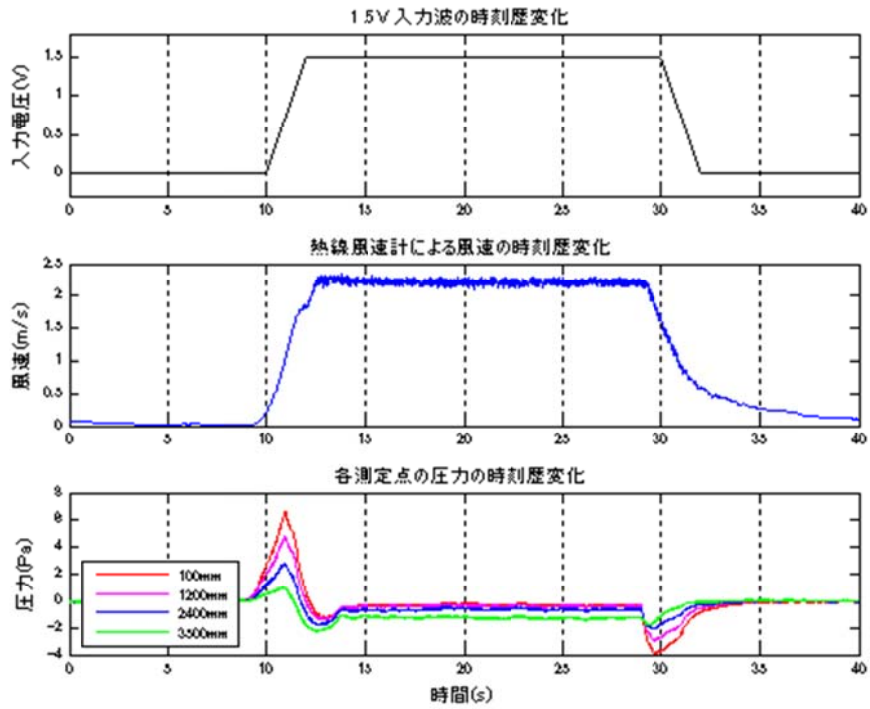


図 5.14 静圧測定結果\_1.5v 入力\_2 秒変化

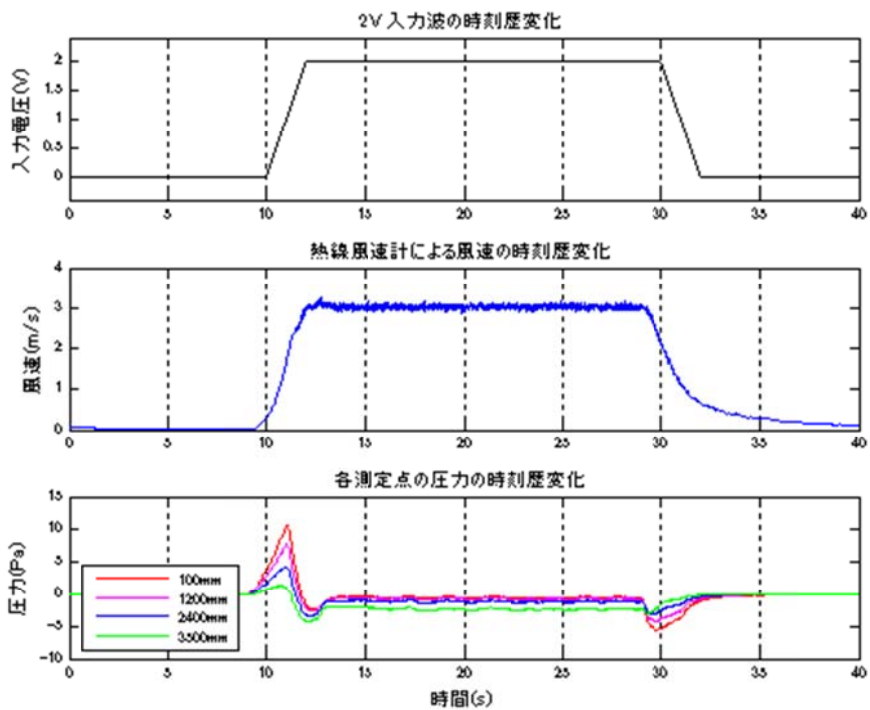


図 5.15 静圧測定結果\_2v 入力\_2 秒変化

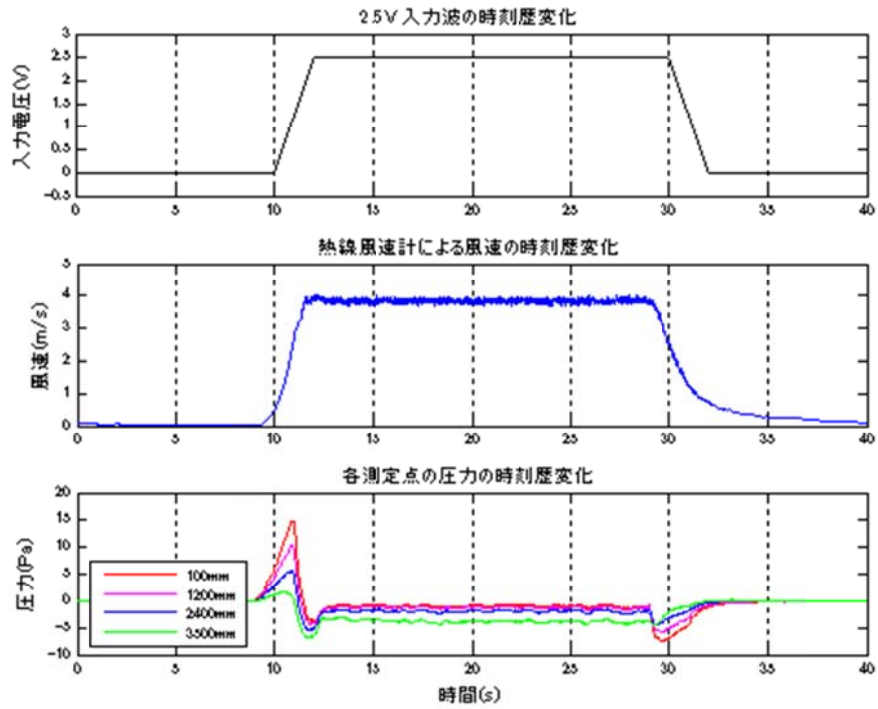


図 5.16 静圧測定結果\_2.5v 入力\_2 秒変化

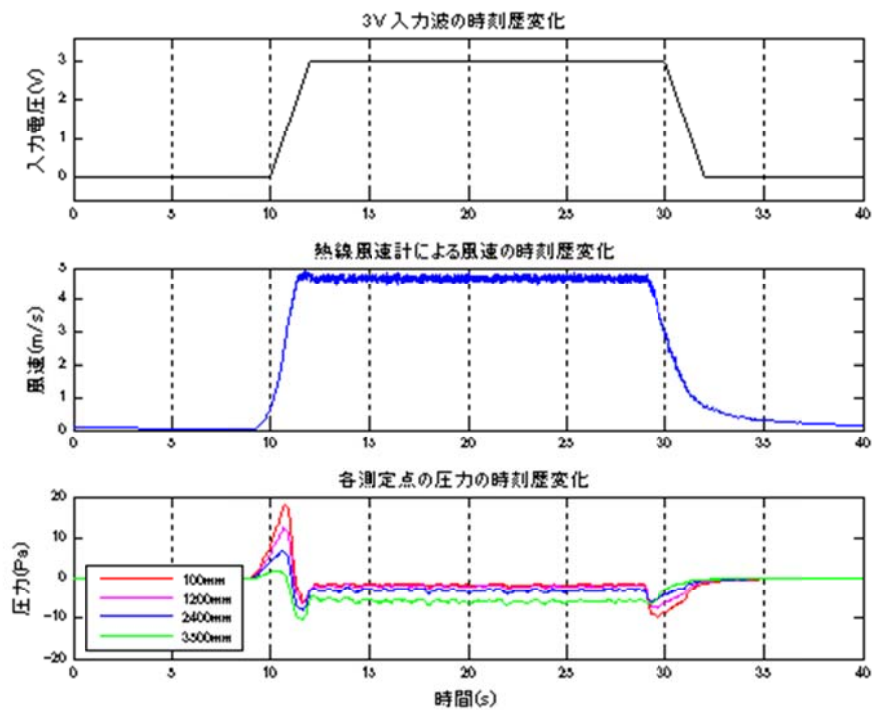


図 5.17 静圧測定結果\_3v 入力\_2 秒変化

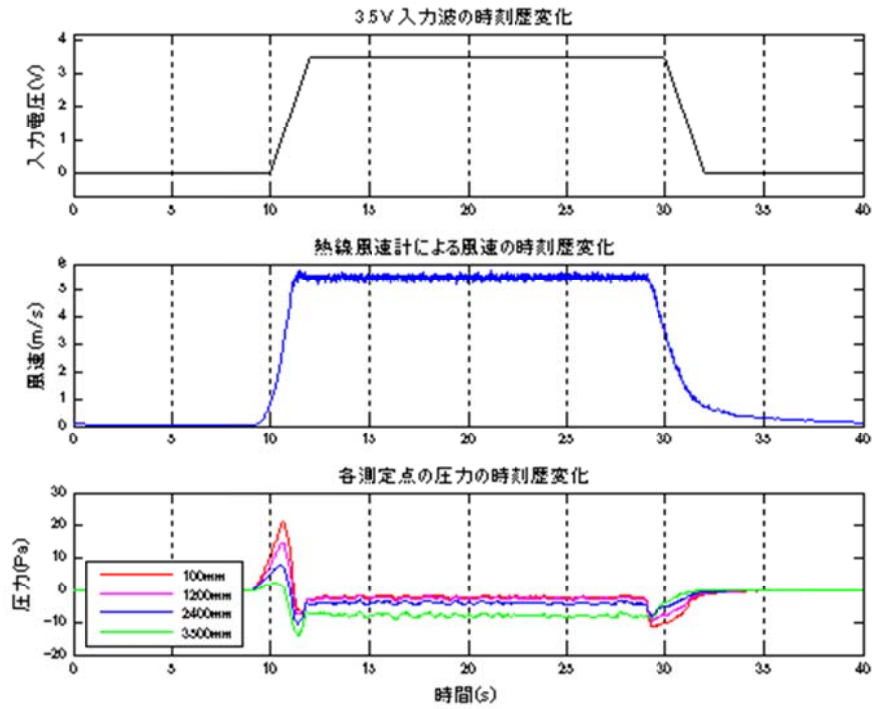


図 5.18 静圧測定結果\_3.5v 入力\_2 秒変化

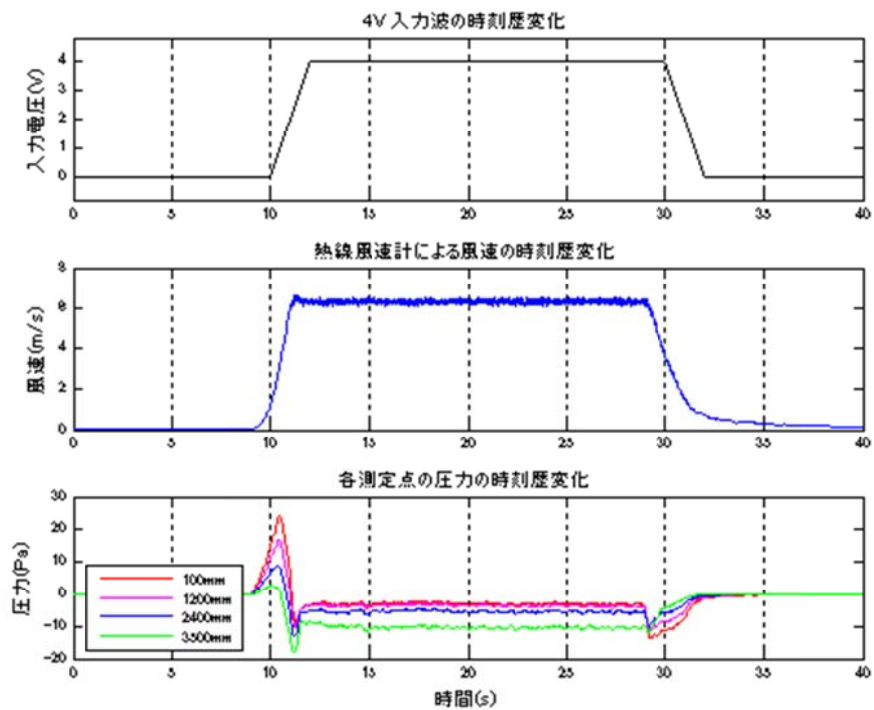


図 5.19 静圧測定結果\_4v 入力\_2 秒変化

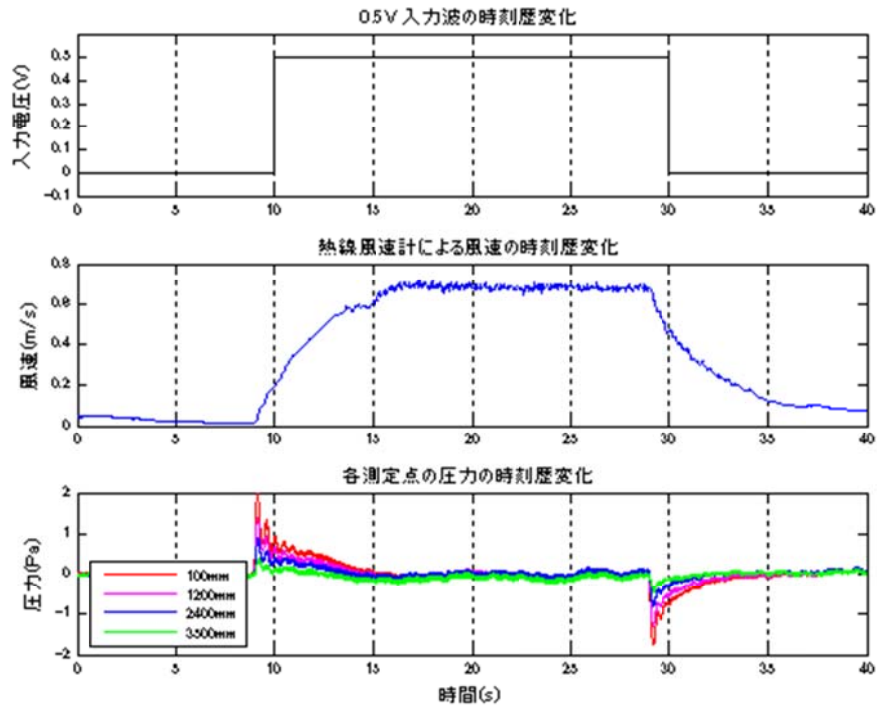


図 5.20 静圧測定結果\_0.5v 入力\_0 秒変化

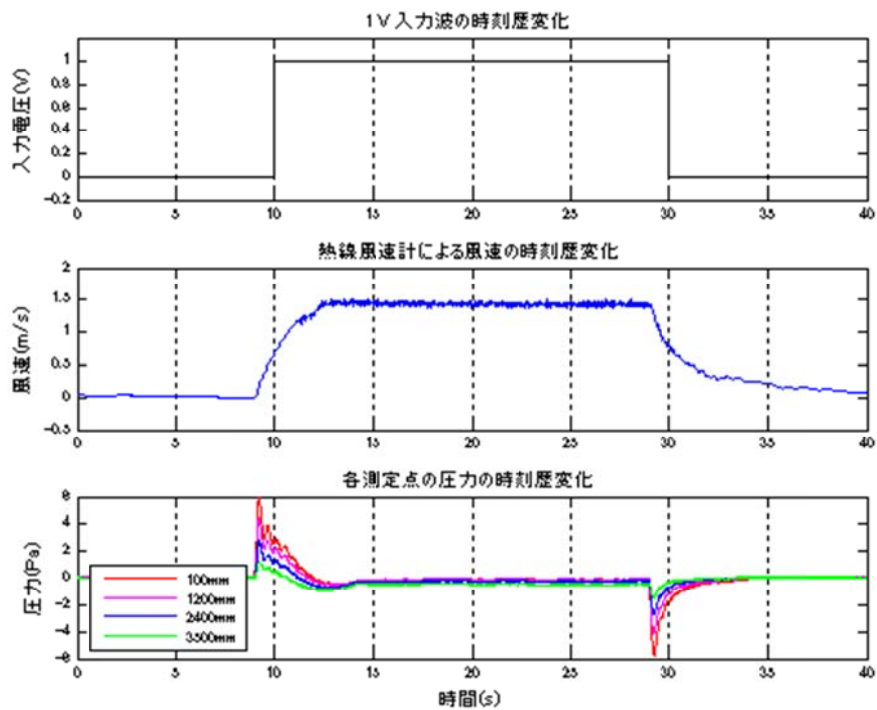


図 5.21 静圧測定結果\_1v 入力\_0 秒変化

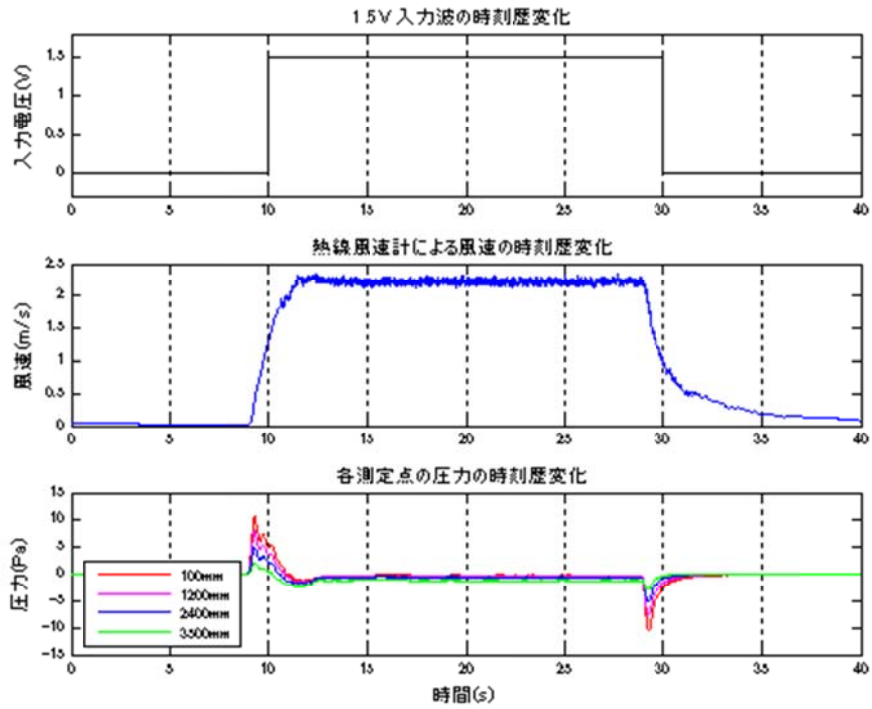


図 5.22 静圧測定結果\_1.5v 入力\_0 秒変化

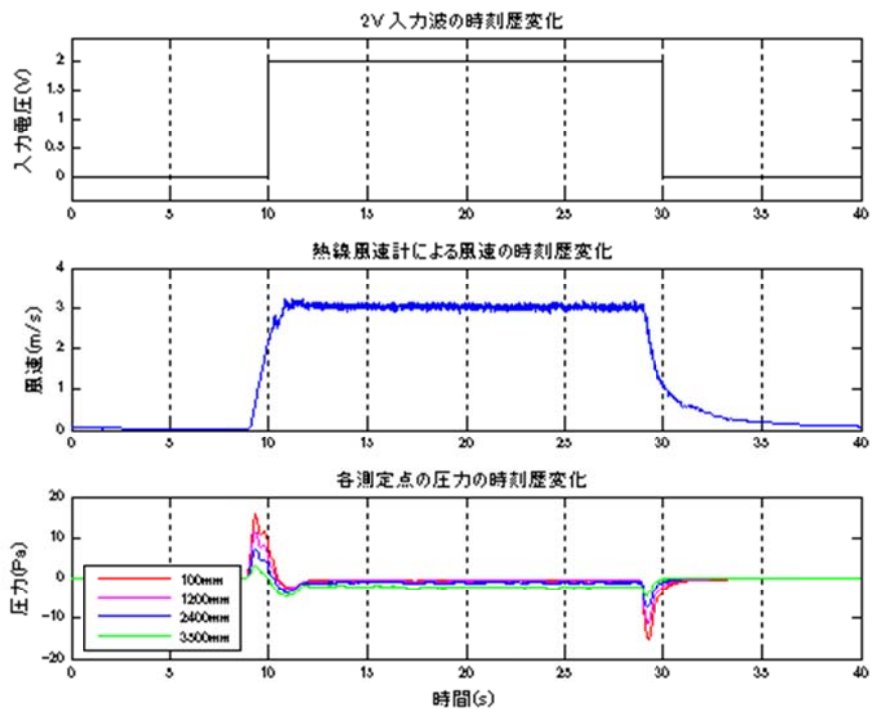


図 5.23 静圧測定結果\_2v 入力\_0 秒変化

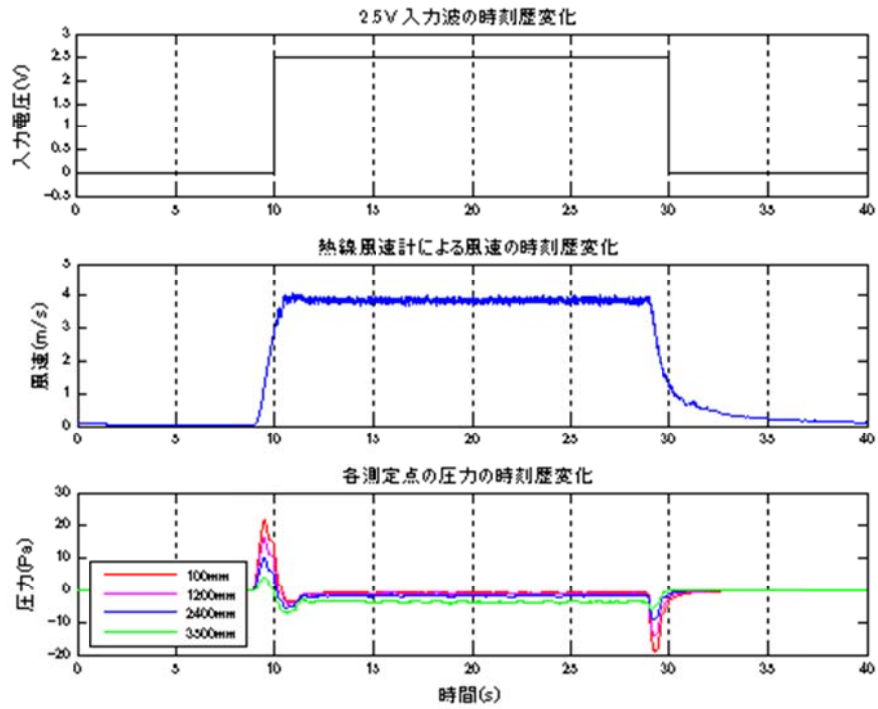


図 5.24 静圧測定結果\_2.5v 入力\_0 秒変化

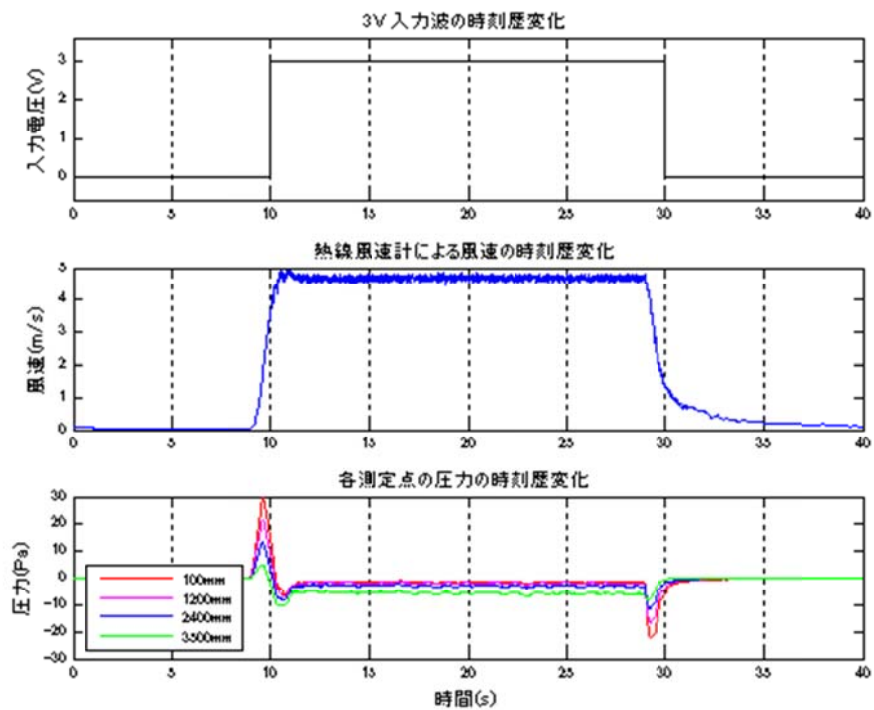


図 5.25 静圧測定結果\_3v 入力\_0 秒変化



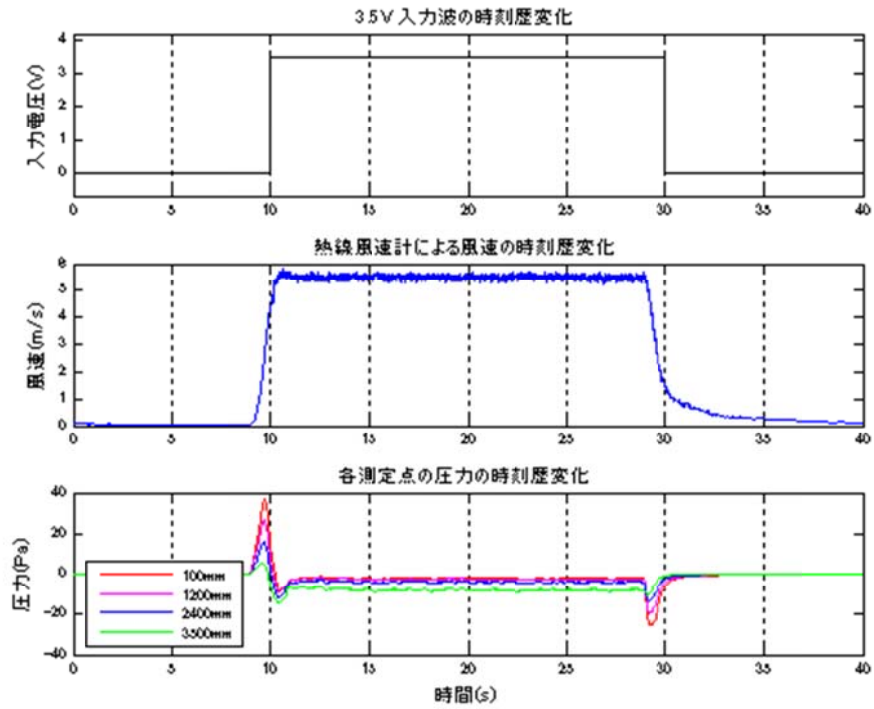


図 5.26 静圧測定結果\_3.5v 入力\_0 秒変化

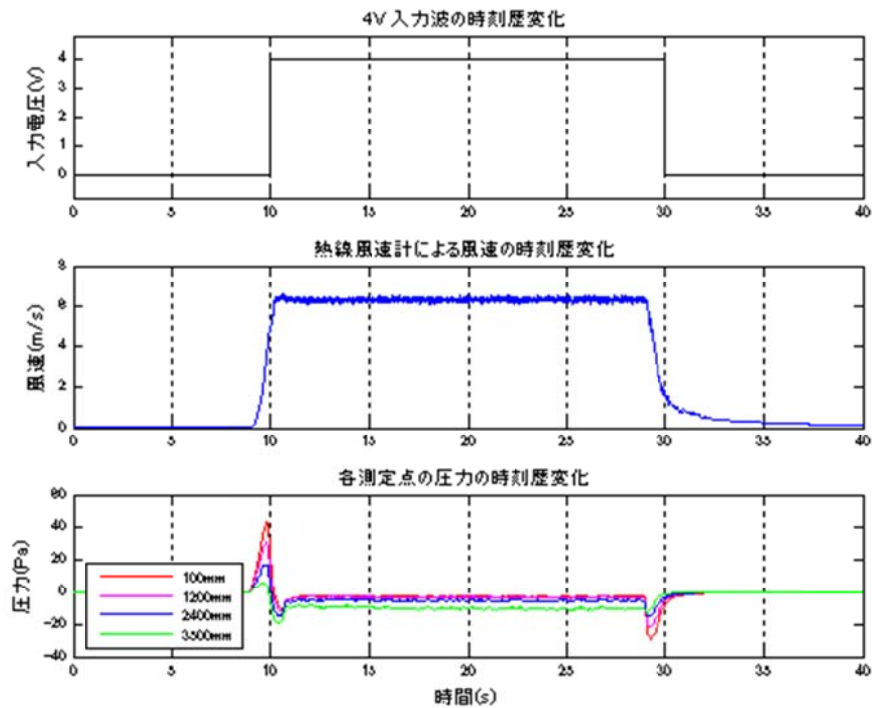


図 5.27 静圧測定結果\_4v 入力\_0 秒変化

## 5. 2. 2 結果の考察

これらの結果を、まず風速の安定した時の様子と、風速増加あるいは減少時の非定常変化時の様子に分けて考える。

まず、風速安定時の様子である。図 5.4 から図 5.27 では風速安定時に、ファンから遠い地点ほど負圧が大きく出ている様子が見受けられる。測定位置と静圧の関係を図 5.28 に示す。このグラフからは、各測定点値は乱れているものの、概ね 1 次線形に負圧が大きくなっている様子が確認できる。これらの乱れの原因としては、測定点ごとに入力電圧に関わらず同様の傾向が見て取れるため、圧力測定孔自体のゆがみや、その付近の風洞床面のざらつきなどが関係してくると考えられる。また、ファンに近い場所、及び開放部付近で負圧が大きくなっているのは、ファンに近い部分では風洞の形状が縮流するために狭くなっていること、また、開放部では広がっていることが影響していると考えられる。

また、各測定点における入力電圧と静圧の関係を図 5.29 に示す。このグラフからは、いずれの測定点における負圧についても入力電圧に対して 2 次式の関係にあることが分かる。ここで式 2.1 に従えば、入力電圧と風速とは 1 次線形の関係にあることが分かっている。よって、風速安定時の静圧は風速の 2 乗に関係しているものと考えられる。このことは基準速度圧

$$qH = \frac{1}{2} \rho U_R^2 \quad (5.3)$$

$qH$  : 基準速度圧 (Pa)

$U_R$  : 基準風速 (m/s)

の考えによって説明されるものであると考えられる。

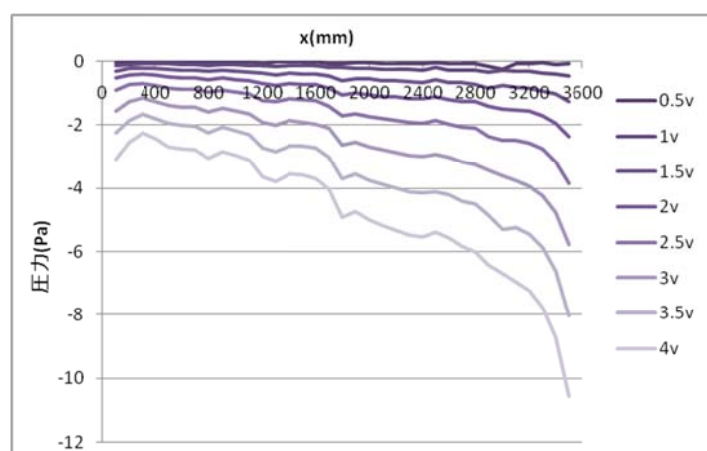


図 5.28 測定位置と静圧の関係

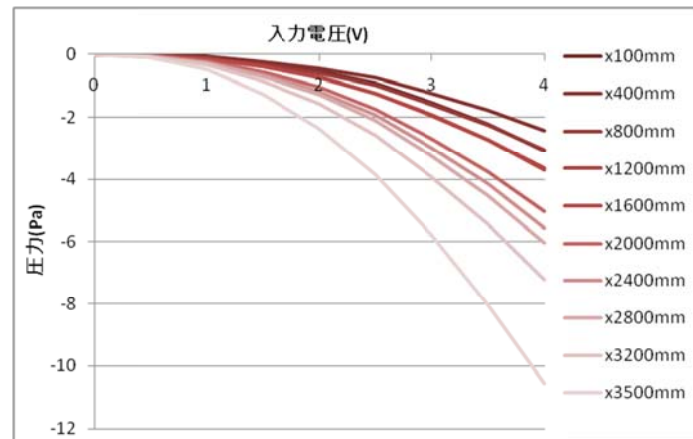


図 5.29 入力電圧と静圧の関係

次に、風速が非定常に変化している時の様子について考える。いずれの計測においても、風速上昇時、及び風速下降時にそれぞれ正圧のピーク、負圧のピークが発生していることが確認できる。以後、変化前の圧力値と圧力ピークの最大値の差をピーク圧力として考える。ここでは圧力に対して、入力電圧の大きさと測定位置、変化にかかる時間がパラメータとして関係してくる。

図 5.30 と図 5.31 にそれぞれ正圧と負圧のピークの大きさと測定位置との関係を示す。ここでは、代表として 2 秒での変化時のグラフを示している。定常時の静圧とは逆に、ピークの大きさは線形に小さくなっていく様子が確認できる。

また、図 5.32 と図 5.33 にピークの大きさと入力電圧の関係を示す。定常時の場合と同様に、入力電圧が大きいほど圧力が大きくなっていくが、定常時の場合と異なるのは、その増加の傾向が 1 次線形的であるということである。この場合、5.3 式とは異なり、発生する圧力は風速と 1 次式の関係にあるということが分かる。

また、図 5.34 と図 5.35 にピークの大きさと風速変化にかかる時間の関係を示す。ここではその代表として基準点としても用いる  $x=600\text{mm}$  の地点における結果を示している。これらの図からは、変化かかる時間が短いほど発生するピーク圧力が大きいことが確認できる。2 秒から 10 秒の間の変化時間をもつものについては、その圧力は累乗近似によってうまく近似できる。また、この近似式に従うとした時、0 秒で変化するように入力したものは、実際の変化にかかる時間は、風速増加時には約 1 秒、風速減少時には約 0.6 秒の変化時間を入力したときと同じ値が出るように考えられる。

以上の実験から、非定常な風速変化時にどのような圧力の変化が起きているのかが分かった。

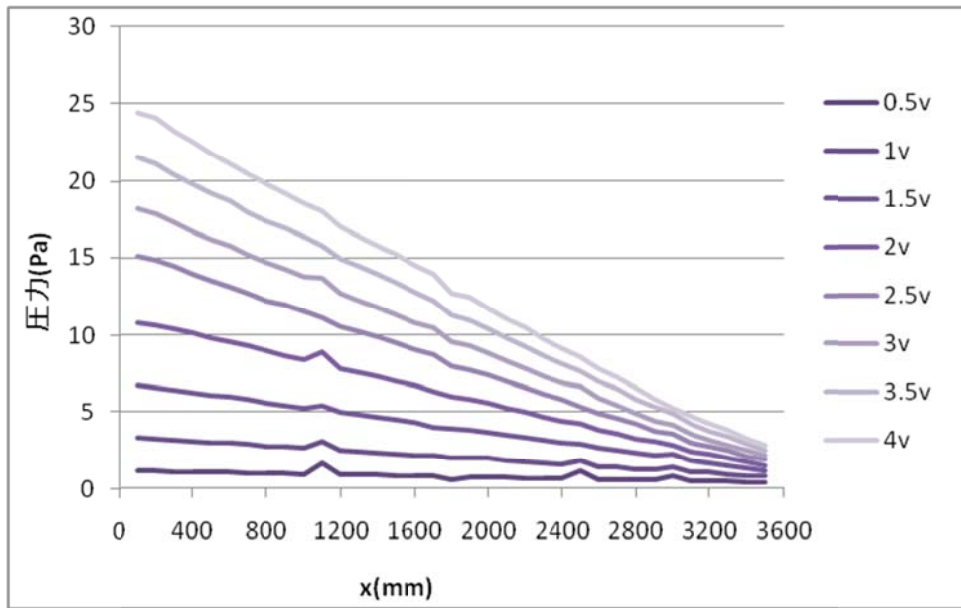


図 5.30 2 秒風速増加時のピーク正圧の測定位置との関係

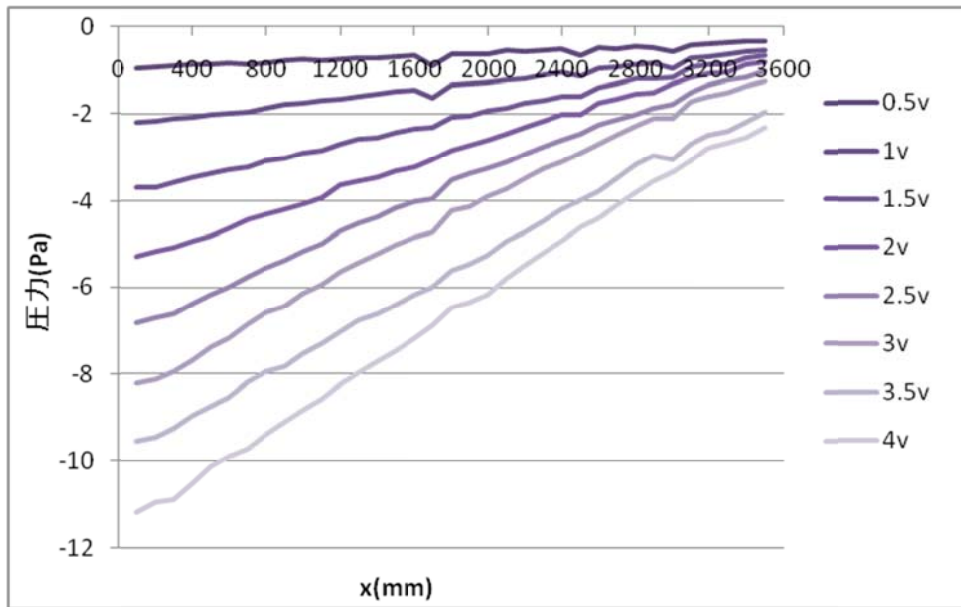


図 5.31 2 秒風速減少時のピーク負圧の測定位置との関係

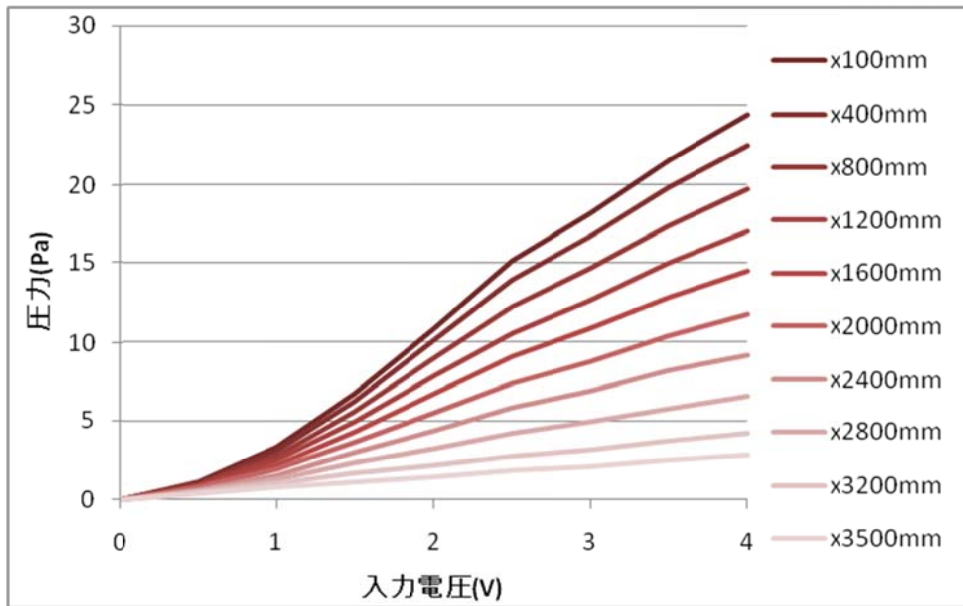


図 5.32 2 秒風速増加時のピーク正圧の入力電圧との関係

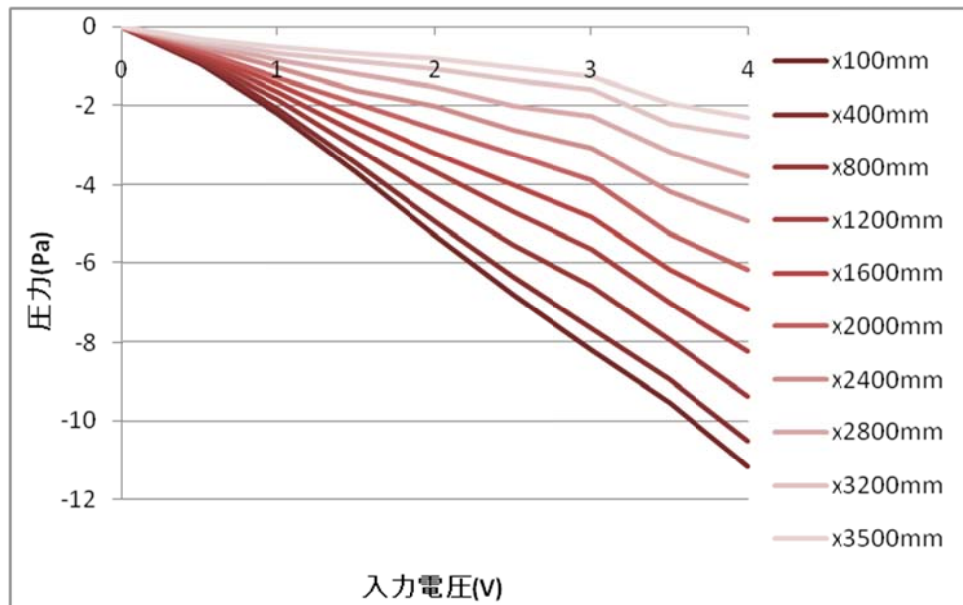


図 5.33 2 秒風速増加時のピーク正圧の入力電圧との関係

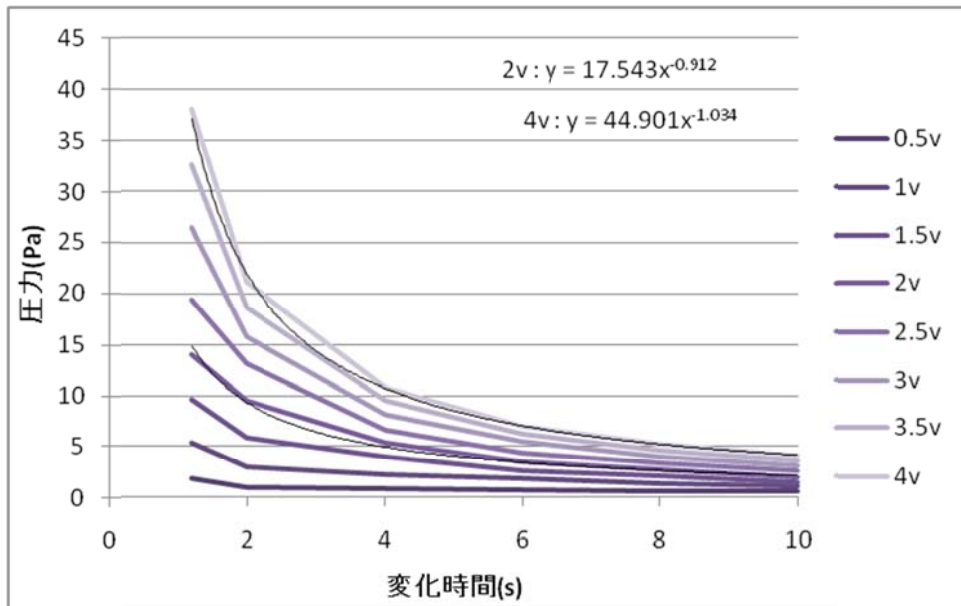


図 5.34  $x=600\text{mm}$  での風速増加時のピーク正圧の変化時間との関係

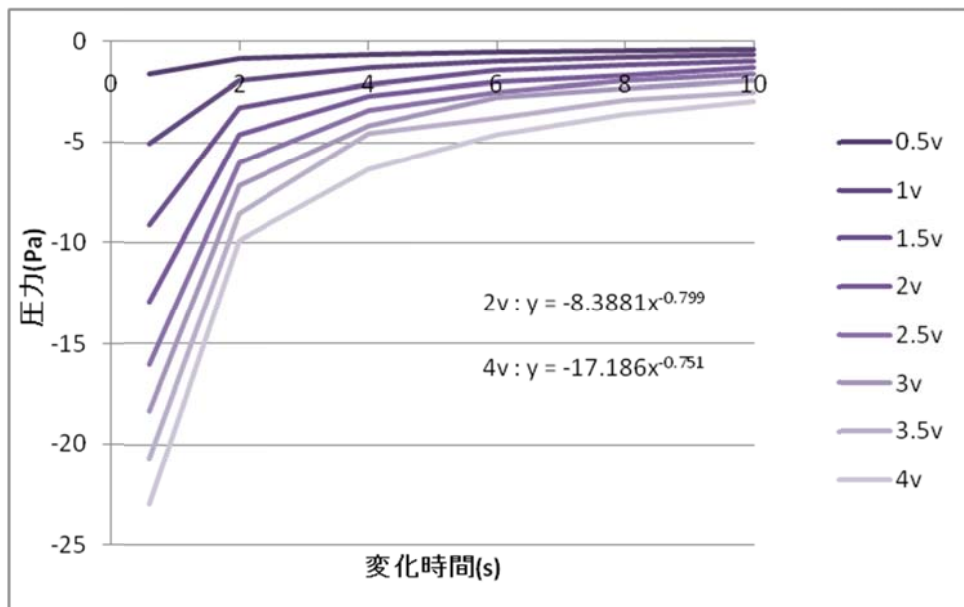


図 5.35  $x=600\text{mm}$  での風速減少時のピーク負圧の変化時間との関係

ここで、本実験にて測定された圧力のピーク値の意味を考える。測定された値は風洞内の静圧にあたるものと考えられるので、模型を設置した場合にも、模型周辺で同様のピークが表れていると考えられる。

ここで問題となるのは、基準とする静圧である。今まで測定したような、非定常に変化する静圧を基準とした場合、模型表面で測定される風圧係数は変化しないものと考えられる。しかし、作用する圧力としては、実際にはそれより大きい。例として、3Vの入力電圧を与えた時の2秒で変化する場合の圧力の変化（図 5.17 に対応する）の時に、模型正面の風圧係数が1の場所における圧力の時刻歴変化を図 5.36 に示す。この図は仮定の下で計算によって求めたものであるが、風速上昇時に模型正面部における圧力はピーク値を示し、その値は風速安定時の想定圧力よりおよそ 1.9 倍になっている。また、風圧係数に直してみると、非常に大きくなっていることが分かる。このことは、非定常性を考慮することによって導き出される問題の一つといえる。

建物の応答を考える場合、内圧と外圧の差が問題となる。内部の静圧が外部の静圧に追従して変化しない場合などに、このようなピーク圧力の影響が大きくなってくると思われる。ケースとしては、密閉された、内部と外部が完全に遮断された建物などでこのような影響が出てくると考えられる。しかし、それ以外にも、内側と外側にあたる部分で静圧が同時に変化しないのならば、このようなことはどこでも起こりうる。

ここで一つ問題となるのは、ここで測定されたピーク圧はあくまで風洞実験によるものであるということである。実現象中で、突風の立ち上がり時等に静圧がどのように変化するかは不明であり、実際の測定実験を通してその点を解明することで、これらの非定常な影響を論じることが出来るであろう。

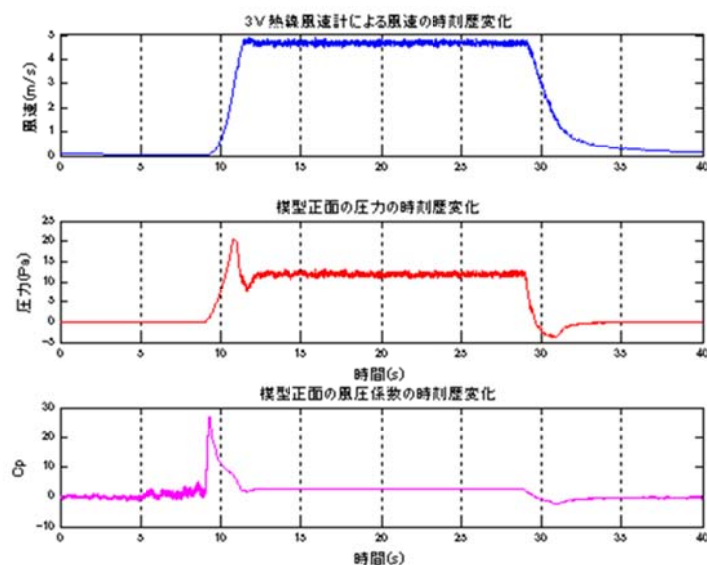


図 5.36 模型正面部を仮定した時の表面圧力の時刻歴変化

## 5. 3 風向変化時における風洞内静圧分布

### 5. 3. 1 特定面内における静圧分布の確認

次に、非定常に風向を変化させた場合の風洞内の静圧の変化の様子について確認する。実験は、3章にて作成した気流について確認する。実験の方法は風速を変化させた時と同じであるが、特に静圧の鉛直分布について確認し、次に行う模型表面圧力測定実験において、静圧基準点としてどの点が適しているのかを調べた。なお、計測時間は60秒で、サンプリング周波数は1000Hz、それぞれ2回測定してアンサンブル平均を行っている。また、見やすくするために50個のデータからの時間平均を行い、グラフの平滑化を施している。

図5.36から図5.41にNDU5, NDU7, NDU10のそれぞれについて、2秒および10秒で入力波が変化する場合のそれぞれの測定結果を示す。それぞれの図は4段で表現されており、1段目が下段ファンへの入力電圧の時刻歴（風向の変化にほぼ一致する）、2段目に測定された風速時刻歴、3段目に $x=100, 1200, 2400, 3500\text{mm}$ 地点の風洞床面の測定孔の圧力時刻歴を示している。4段目には、 $x=500\text{mm}$ 地点における床面および $z=100, 300, 500\text{mm}$ の壁面での圧力の時刻歴を示している。



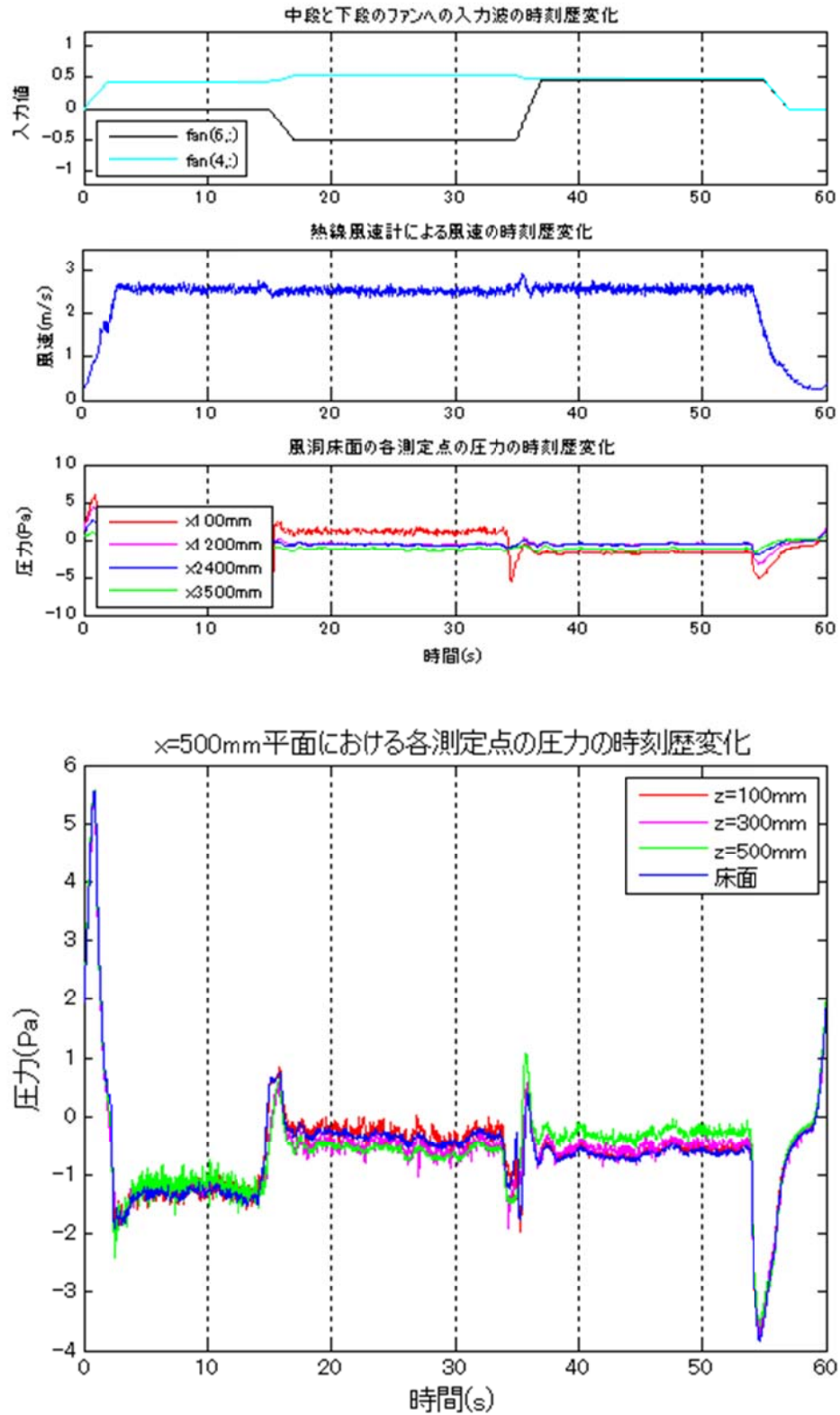


図 5.36 NDU5\_2sec における風洞静圧の時刻歴変化

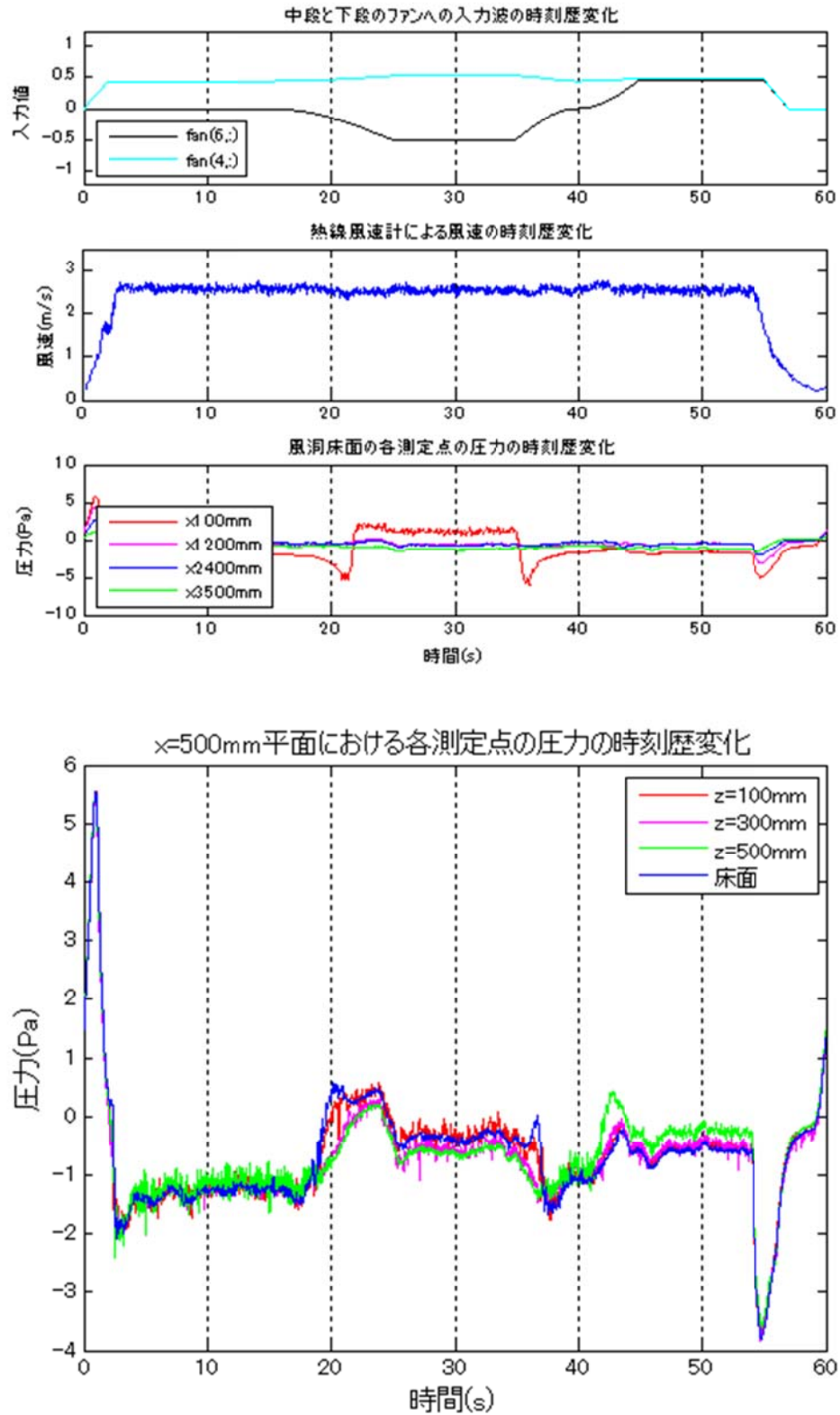


図 5.37 NDU5\_10sec における風洞静圧の時刻歴変化

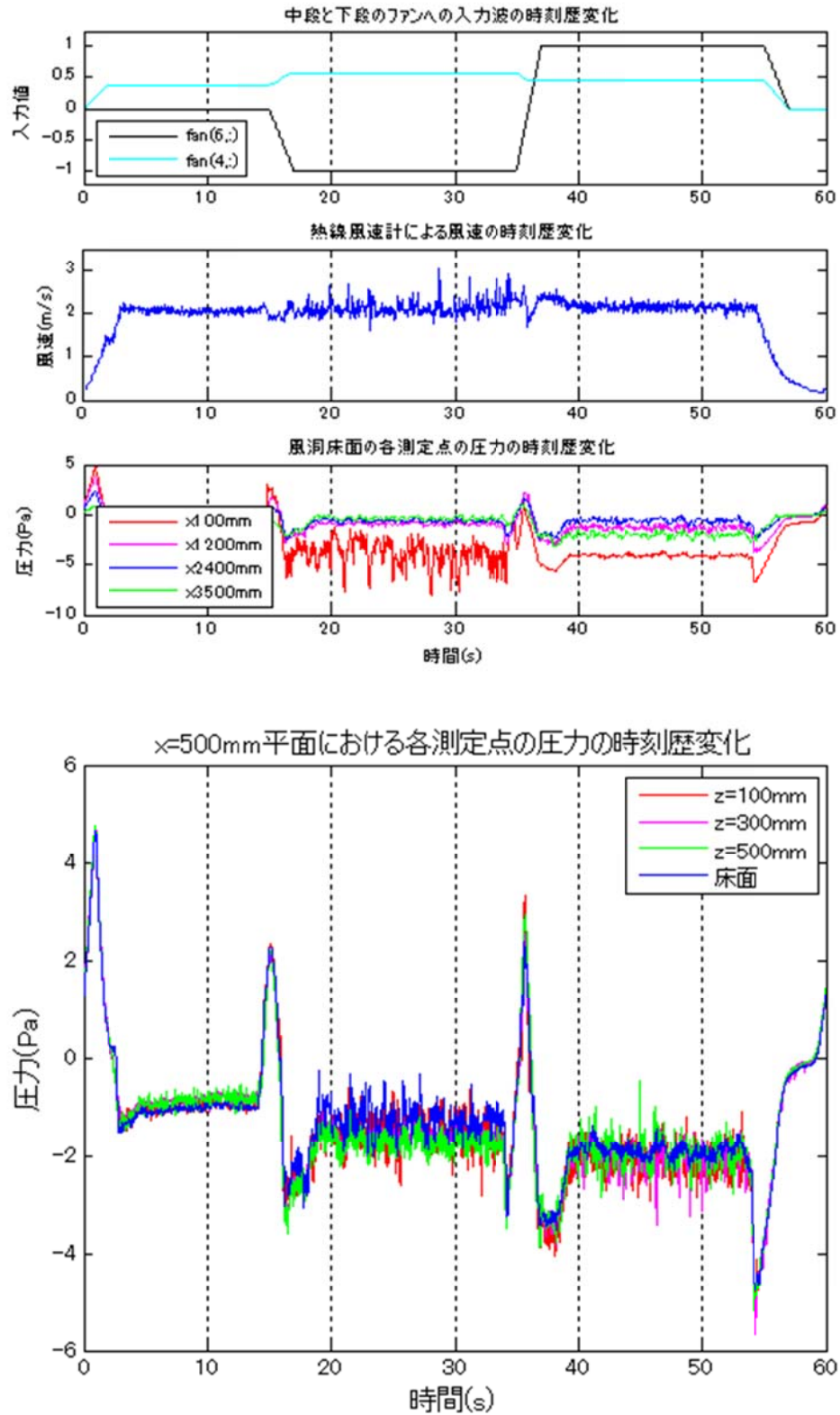


図 5.38 NDU7\_2sec における風洞静圧の時刻歴変化

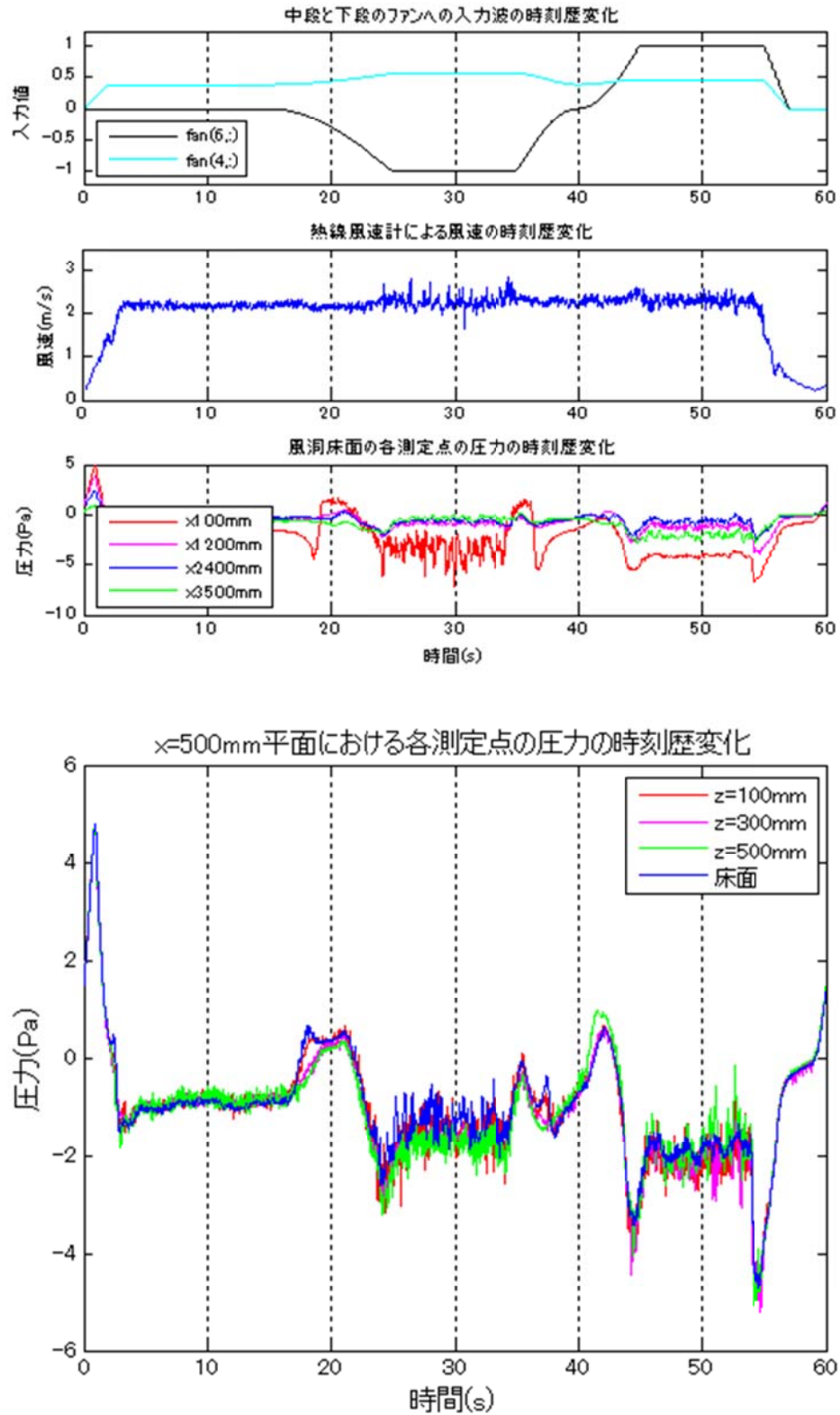


図 5.39 NDU7\_10sec における風洞静圧の時刻歴変化

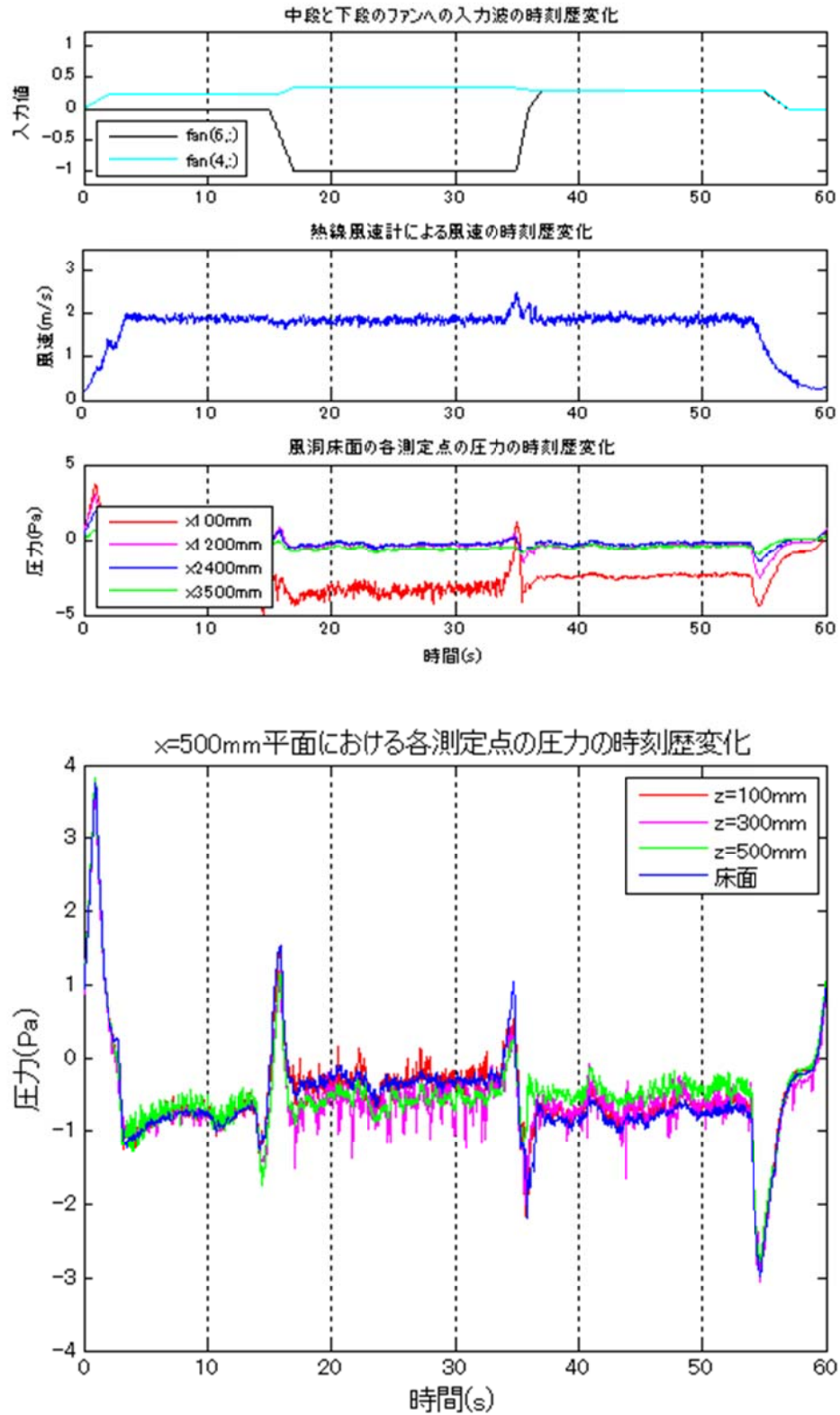


図 5.40 NDU10\_2sec における風洞静圧の時刻歴変化

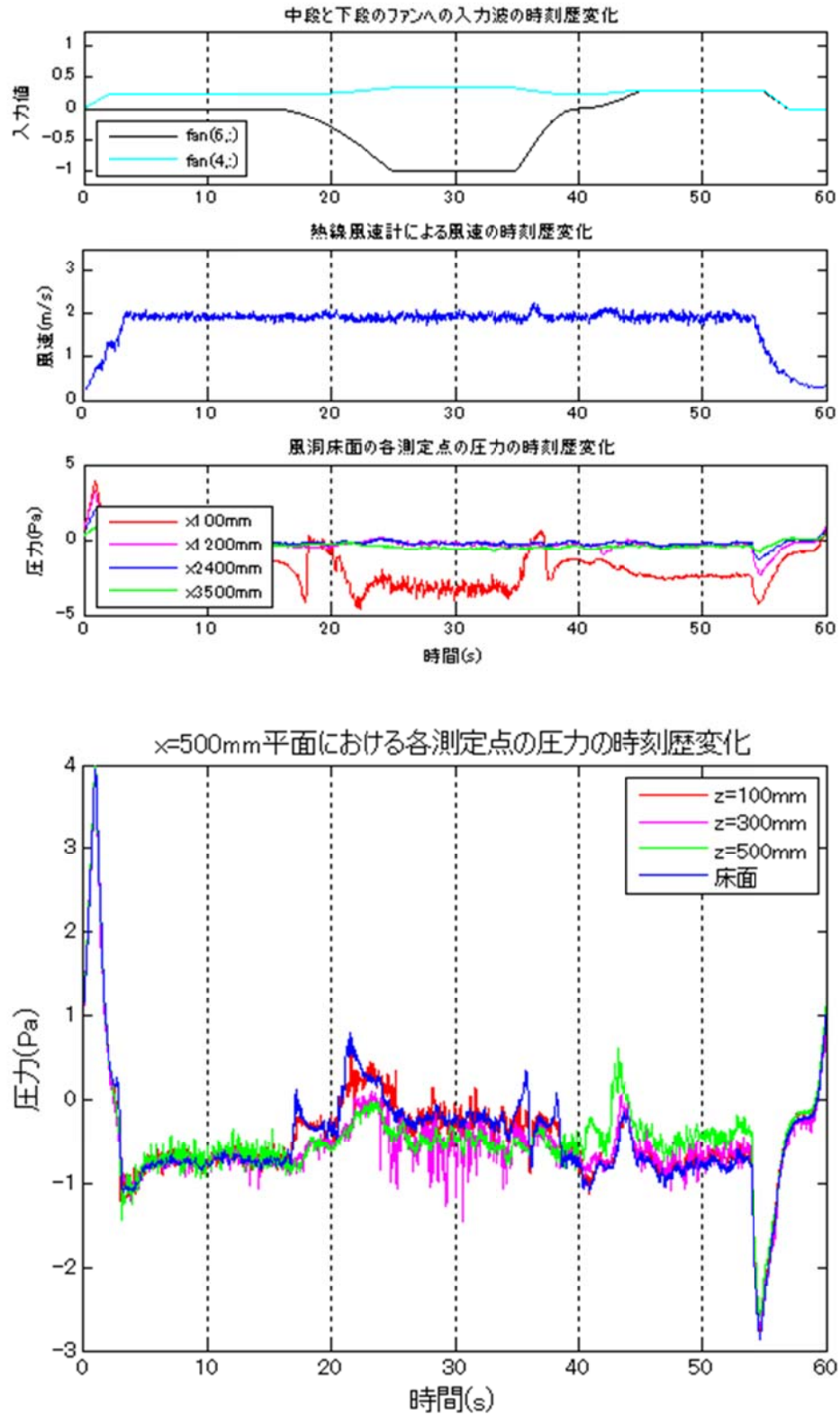


図 5.41 NDU10\_10sec における風洞静圧の時刻歴変化

### 5. 3. 2 結果の考察

これらの結果において、風洞底面に着目した場合、先の実験における風速の非定常変化時の結果のような、わかりやすい結果は得られなかった。定常時であれば、特に  $x=100\text{mm}$  の地点において、大きく乱れているほか、NDU5 の測定であった図 5.36、図 5.37 では Down の状態の時に圧力としても正の値が得られた。これは、 $x=100\text{mm}$  付近で風洞底面に気流が上から当たっている状態になっていると予想される。また、非定常変化時には、風速減少と増加時のピークが織り交ざったような結果が得られた。これは、下段のファンを正回転から逆回転させることで風速のベクトルの反転が起き、その際の風速減少と増加の影響が表れているものと考えられる。いずれにしろ、風向変化時の風洞底面における静圧は、ファンに近い場所であるほど大きく乱れているといえそうである。

また、風洞側面にて測定された圧力値を見てみると、グラフの最初と最後のように、全てのファンに対する入力と比較的一律に行われている場合には、 $x=500\text{mm}$  の同一平面内にある測定点における圧力測定値は一律に変化している様子がうかがえる。しかし一方で、Down や Up の状態、及び、非定常変化時の様子については各測定点の値は似たような変化の仕方をするものの、値が一致しているとはいえなかった。

ここで、基準静圧孔として取りうるものを考える。3章にて作成した気流データは、2次元的な風向変化をつくり出すものである。6段3列のファンの内、鉛直方向6段のファンへの入力を変化させたものであり、特定の段の3つのファンへの入力値はそれぞれの段で同じになっている。このことから、同一平面内における圧力の測定においても風向変化時には異なった値となってしまう以上、模型を設置する基準点と同じ静圧場の変化が保障されるのは、基準点の  $x$  座標と  $z$  座標が同一となる直線上の点だけといえる。str5 における模型設置の基準点は  $(x, y, z)=(900, 300, 300)$ 、str7 及び str10 における模型設置の基準点は  $(x, y, z)=(600, 300, 300)$  であるので、それぞれ str5 では  $(x, z)=(900, 300)$ 、str7 及び str10 では  $(x, z)=(900, 300)$  の直線上にピトー管を設置するか、圧力測定孔を設けて静圧基準点とするのが良いと考えられる。

以上の結果をもって、次に模型を設置しての模型表面風圧測定実験を行う。





## 第六章

### 非定常気流下における基本断面の風圧測定実験

## 6. 1 竜巻状風模擬気流の作成

複数ファン風洞により、第3章で計測した竜巻状渦の部分的な模擬を試みるに当たり、まず、ターゲットとする風速・風向変化のオーダーを決定する。竜巻状渦発生装置の実験結果より、すでに言及した、最も風速が大きく変化するある一地点を渦中心が通過する場合と、最も風速が大きく変化する渦右側面が通過する場合の2通りについて図6.1及び、図6.2に示す。その結果及び、複数ファンの入力電圧とファンとの性能上最大風速の50%程の風速1.5~2.0m/s、風向15~20°程度の変化とし、相似則上、変化時間は可能な限り短くする。

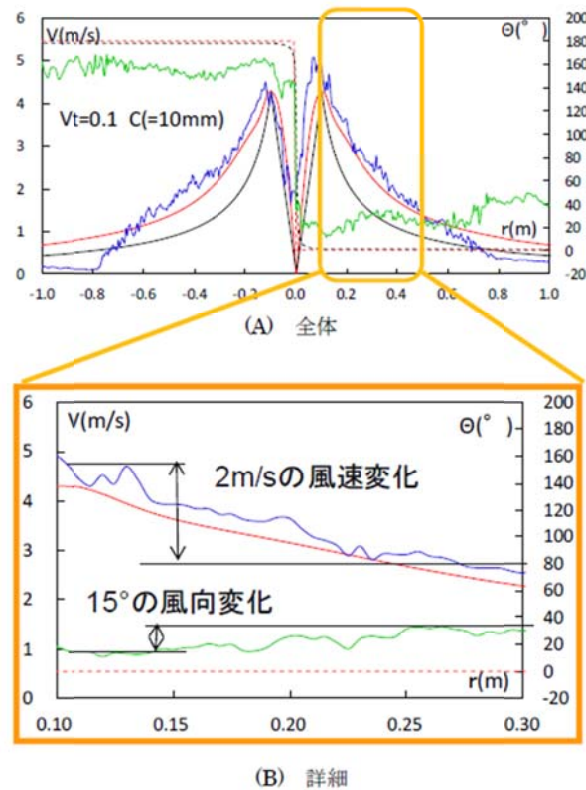


図 6.1 渦中心が通過する時の風速・風向変化の様子

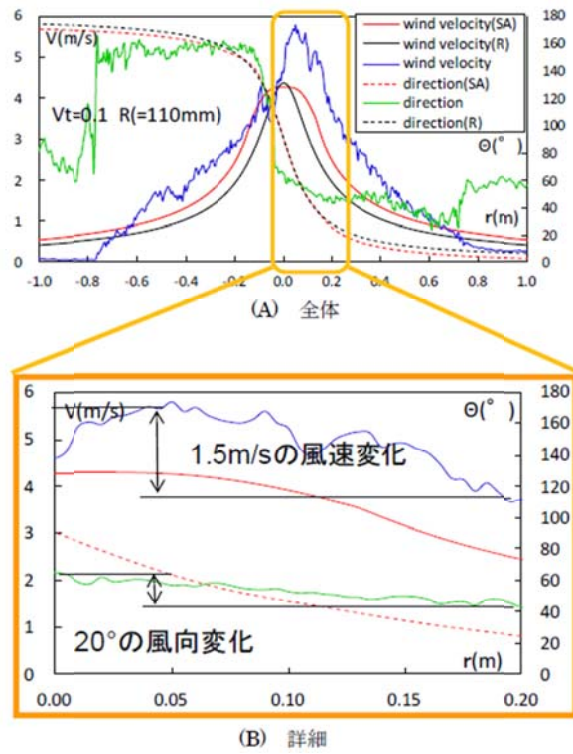


図 6.2 渦右側面が通過する時の風速・風向変化の様子

既往の研究では、風速一定・風向変化気流の作成が試行されており、2s 間で風向が  $20^\circ$  変化する波形が作成されているが、風向変化後に風向のオーバーシュートが出る事、及び風速に若干の上昇が見られる事から、本研究では、まず既往の気流の改良を行う事が必要となる。既往の気流と入力電圧波形を図 6.3 に示す。又、本研究における風向変化の正負についてのイメージ図を図 6.4 に示す。

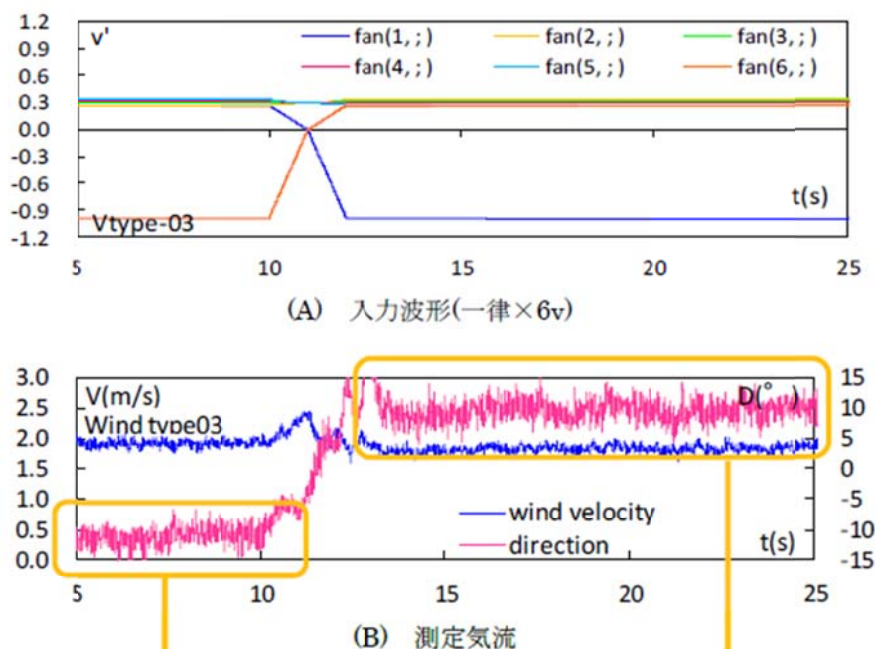


図 6.3 既往の作成波形と気流

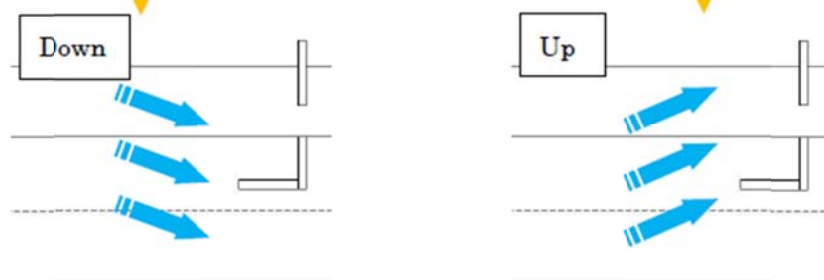
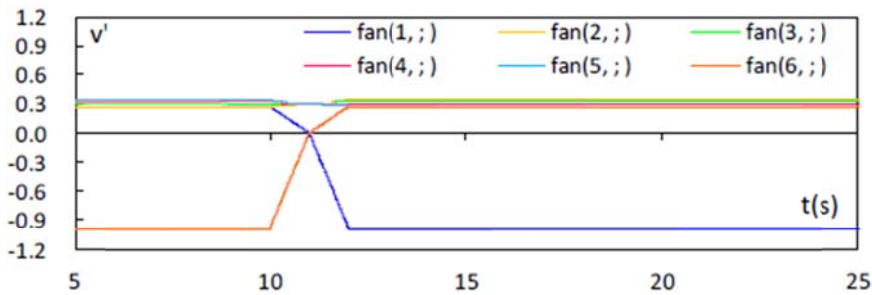


図 6.4 風向正負のイメージ図

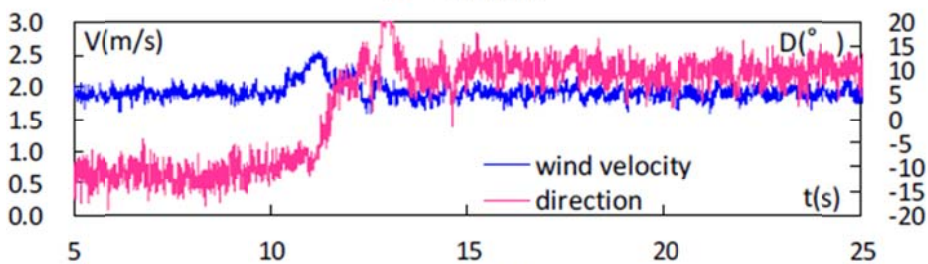
既往の気流を元に風向変化時間の短縮化を試みたが、それぞれのファンへの入力電圧と風向変化の対応について現段階では法則性が見いだせていない為に、様々な入力電圧の組み合わせを試みた(表 6.1)。最終的にはおよそ 1s での変化が可能となったが、ここでは失敗した例について幾つか紹介する。波形改良例を入力電圧波形と気流それぞれについて図 6.5 から図 6.21 に示す。

表 6.1 波形改良例

波形番号	改良点
1	既往の波形
2	1の上下ファンの変化をcos形状にしたケース
3	2の上下ファンの交差点を左にずらした(0.5)ケース
4	1のy方向両端のファンの入力電圧を90%にしたケース
5	1のy方向両端のファンの入力電圧を80%にしたケース
6	1のy方向両端のファンの入力電圧を70%にしたケース
7	1のy方向両端のファンの入力電圧を60%にしたケース
8	1のファン6のみcos形状にしたケース
9	1のファン1のみcos形状にしたケース
10	8のファン6のみタイムラグを入れる(0.5s)ケース
11	8のファン6のみタイムラグを入れる(1.0s)ケース
12	9のファン6のみタイムラグを入れる(0.5s)ケース
13	9のファン6のみタイムラグを入れる(1.0s)ケース
14	1の変化後にファン6のみ強めに(1.2)吹かせるケース
15	1の変化後にファン6のみ強めに(1.4)吹かせるケース
16	2の変化後にファン6のみ強めに(1.2)吹かせるケース
17	2の変化後にファン6のみ強めに(1.4)吹かせるケース

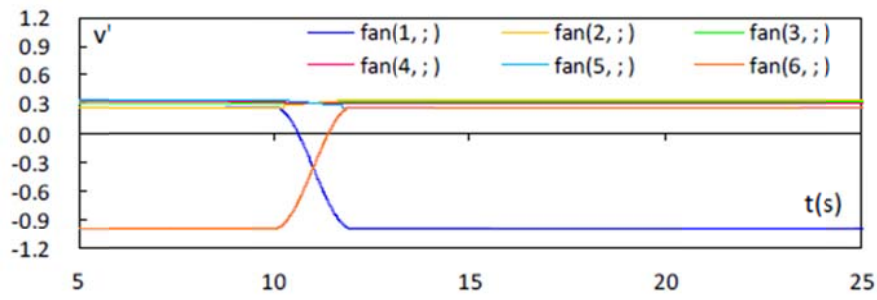


(A) 入力波形

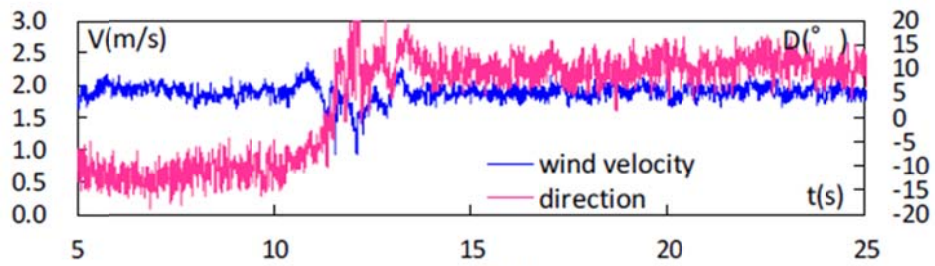


(B) 計測気流

図 6.5 波形番号1

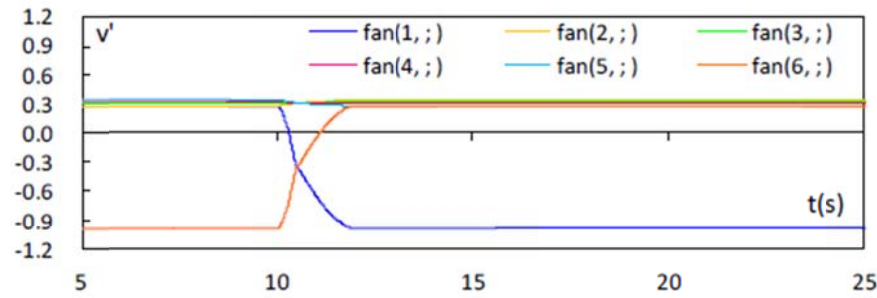


(A) 入力波形

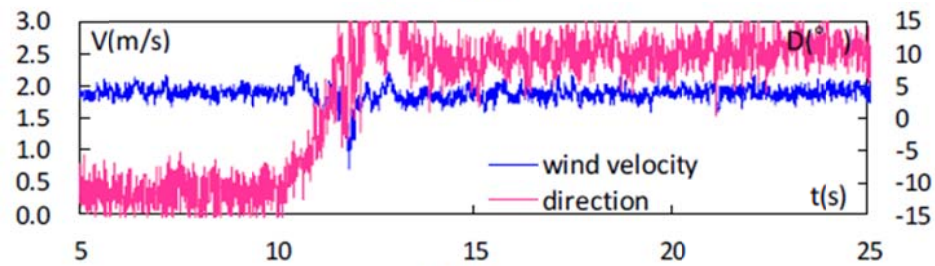


(B) 計測気流

図 6.6 波形番号2

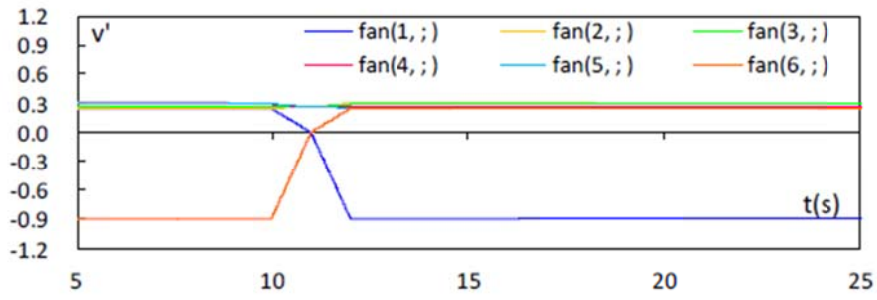


(A) 入力波形

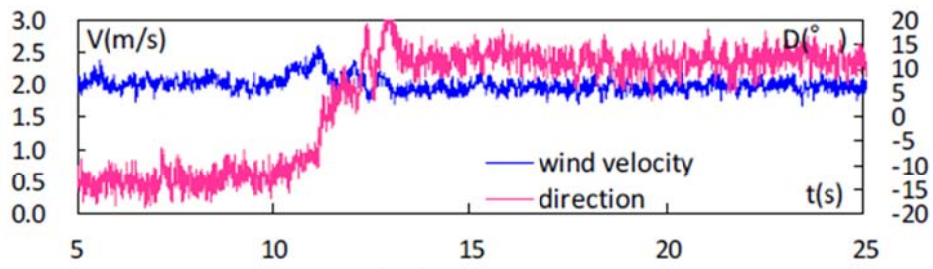


(B) 計測気流

図 6.7 波形番号3

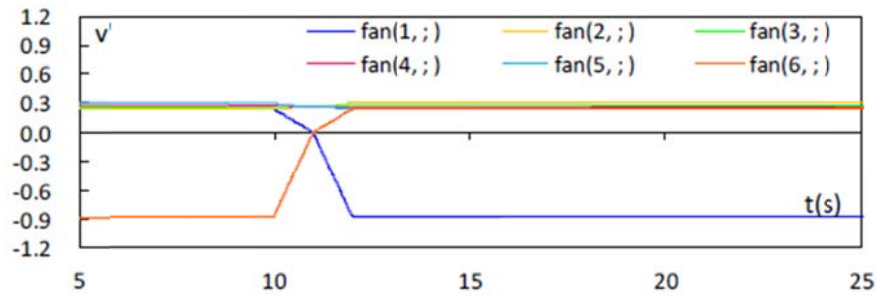


(A) 入力波形

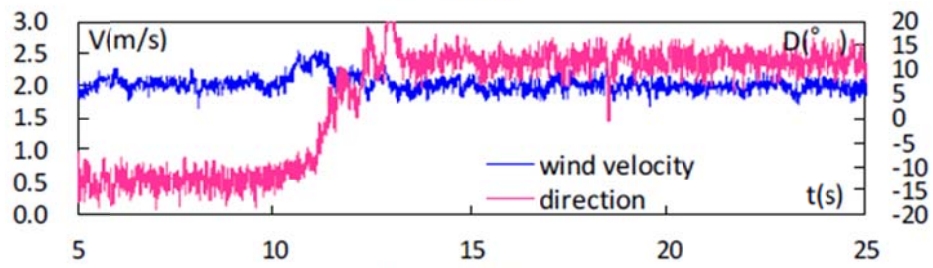


(B) 計測気流

図 6.8 波形番号4

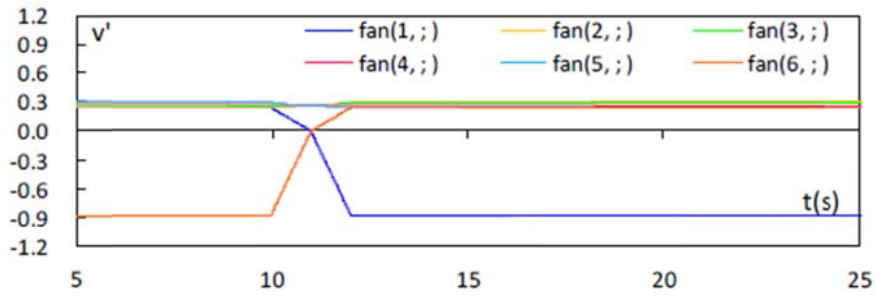


(A) 入力波形

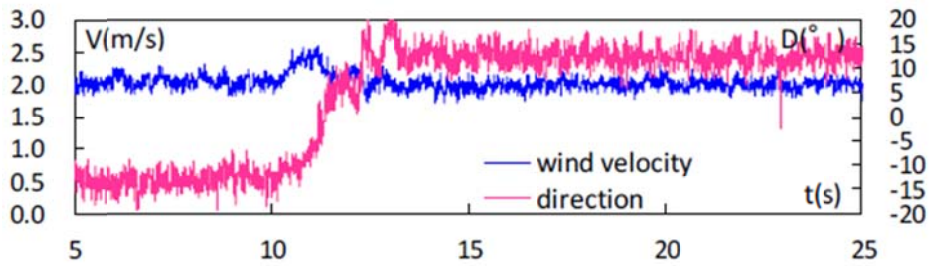


(B) 計測気流

図 6.9 波形番号5

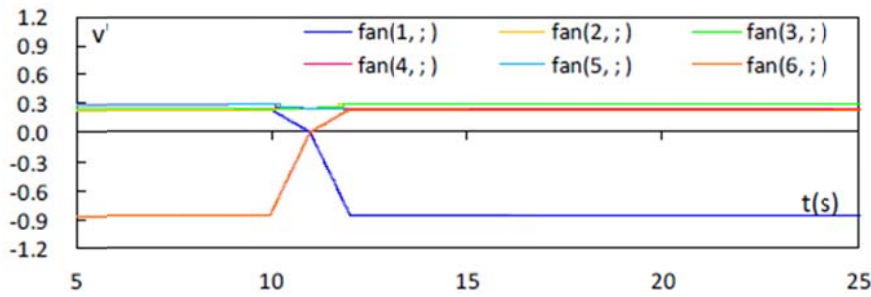


(A) 入力波形

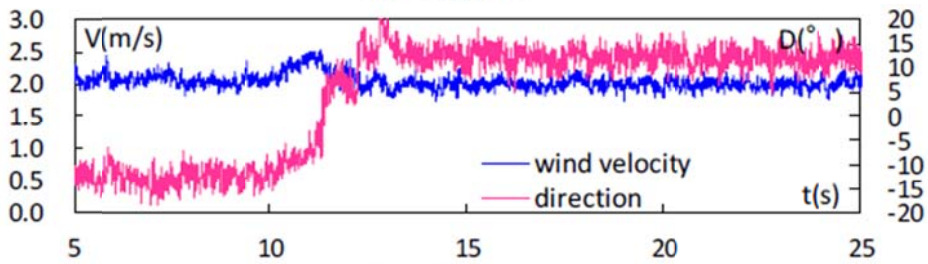


(B) 計測気流

図 6.10 波形番号6



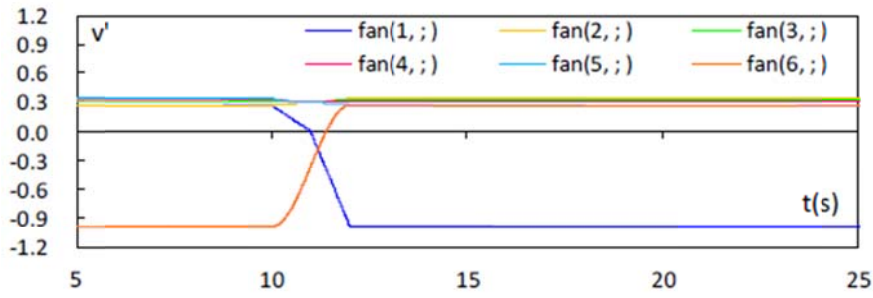
(A) 入力波形



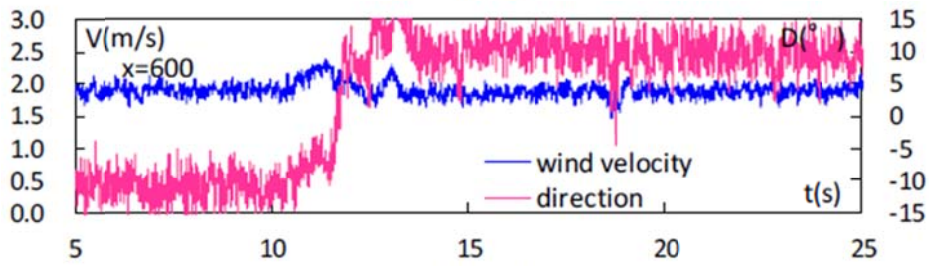
(B) 計測気流

図 6.11 波形番号7



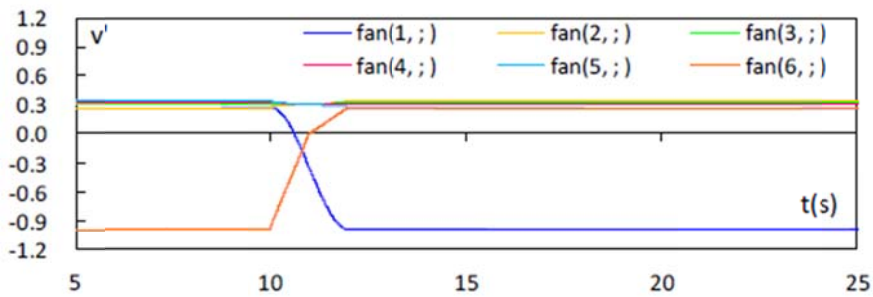


(A) 入力波形

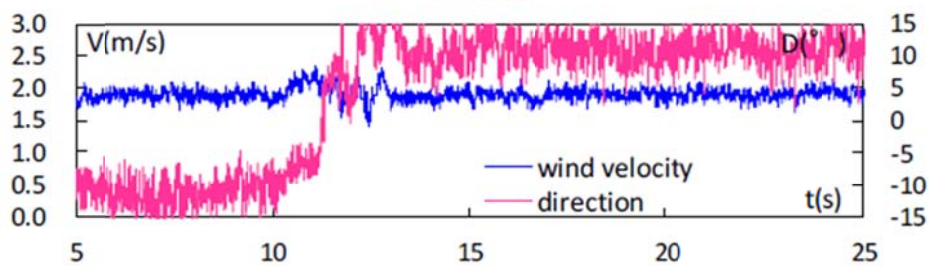


(B) 計測気流

図 6.12 波形番号8

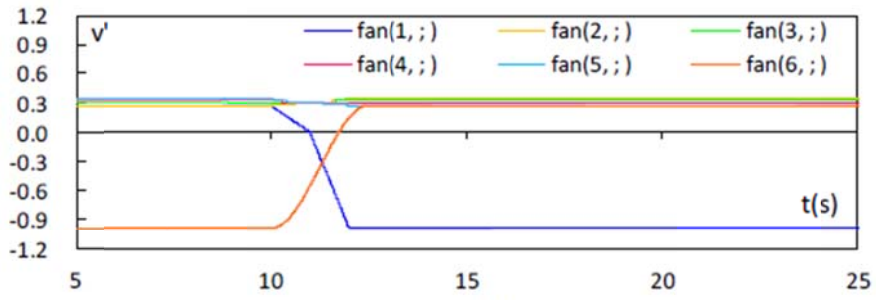


(A) 入力波形

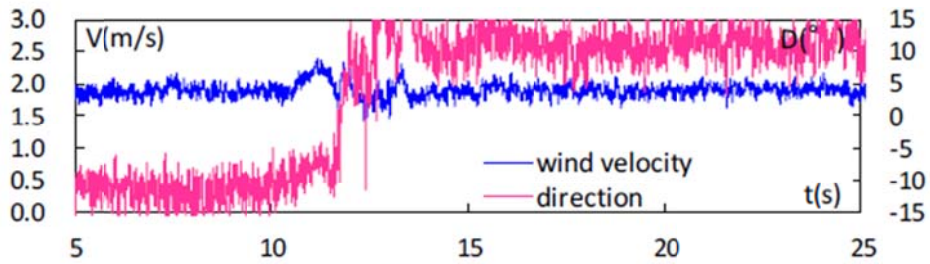


(B) 計測気流

図 6.13 波形番号9

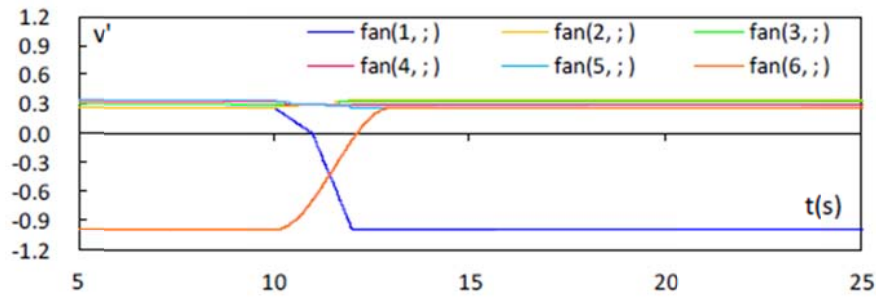


(A) 入力波形

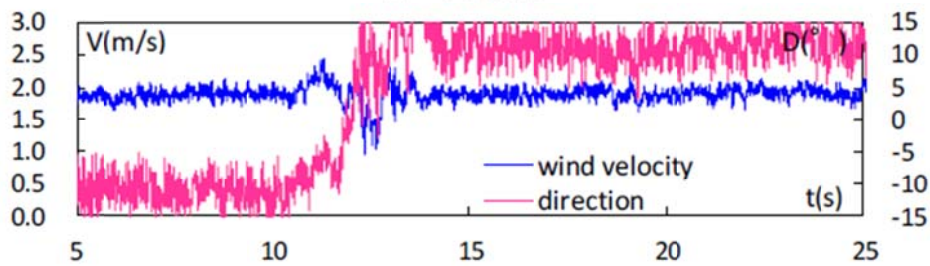


(B) 計測気流

図 6.14 波形番号10

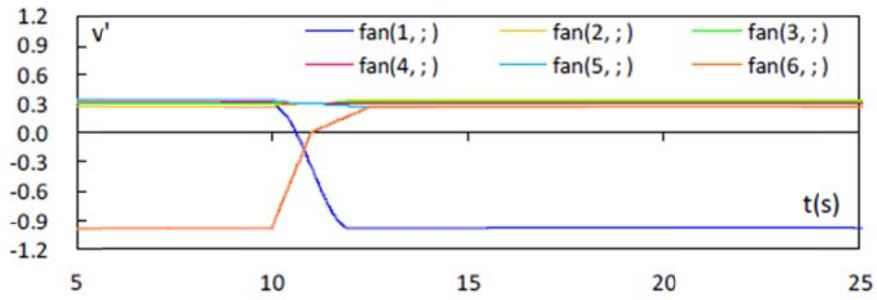


(A) 入力波形

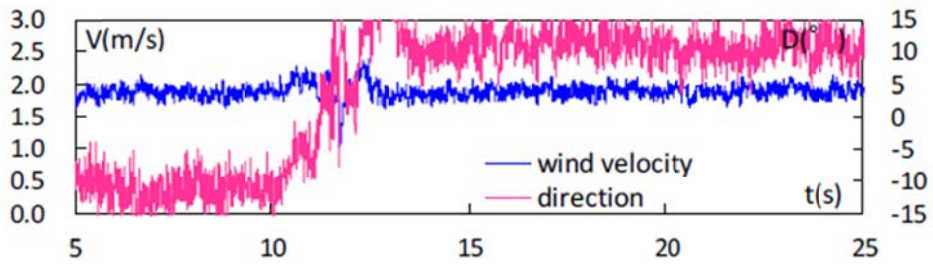


(B) 計測気流

図 6.15 波形番号11

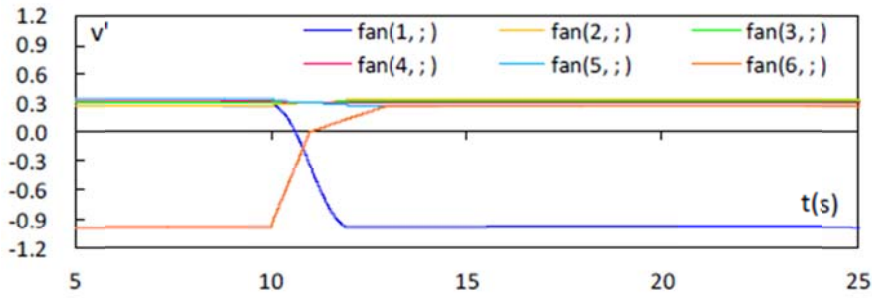


(A) 入力波形

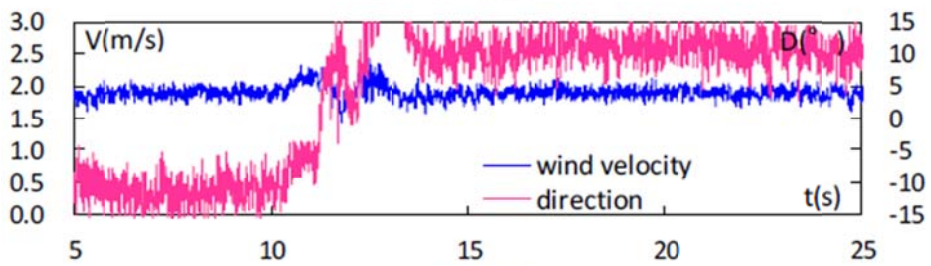


(B) 計測気流

図 6.16 波形番号12

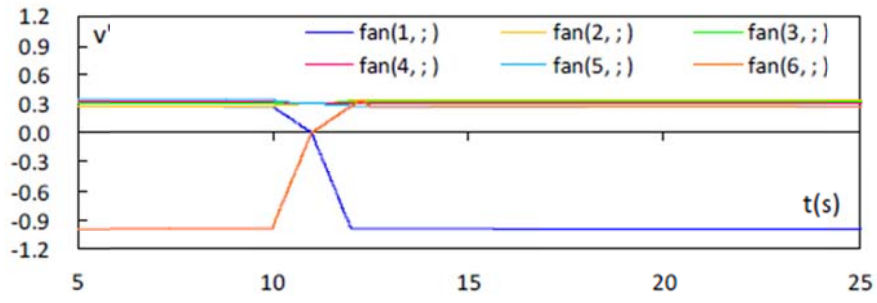


(A) 入力波形

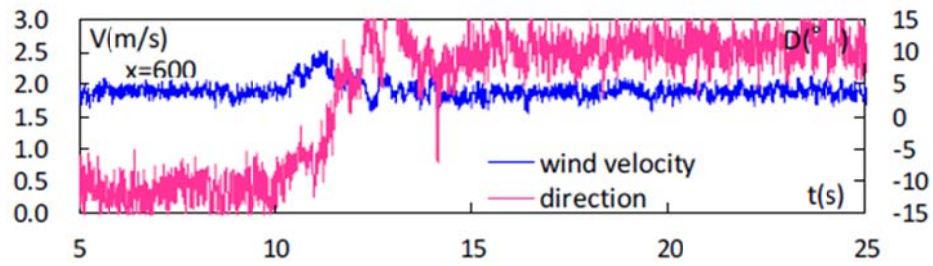


(B) 計測気流

図 6.17 波形番号13

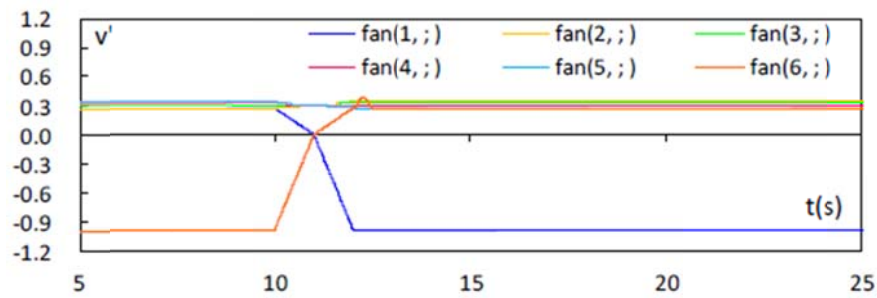


(A) 入力波形

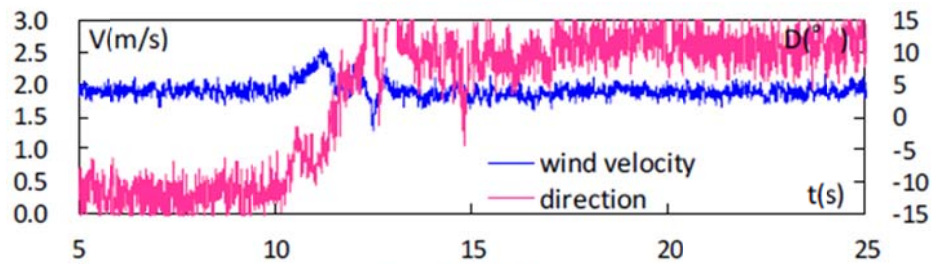


(B) 計測気流

図 6.18 波形番号14

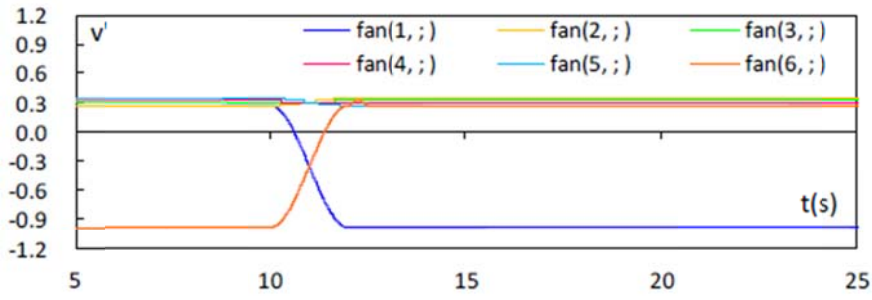


(A) 入力波形

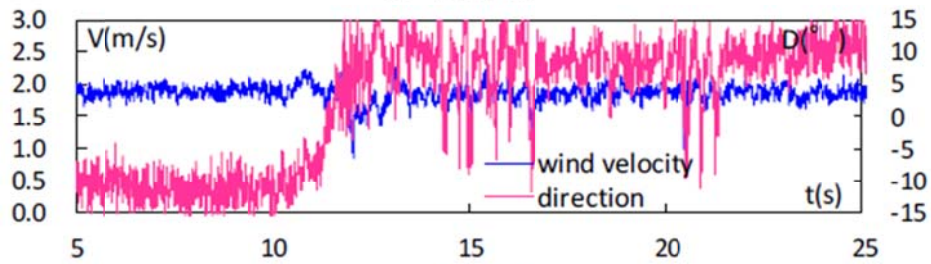


(B) 計測気流

図 6.19 波形番号15

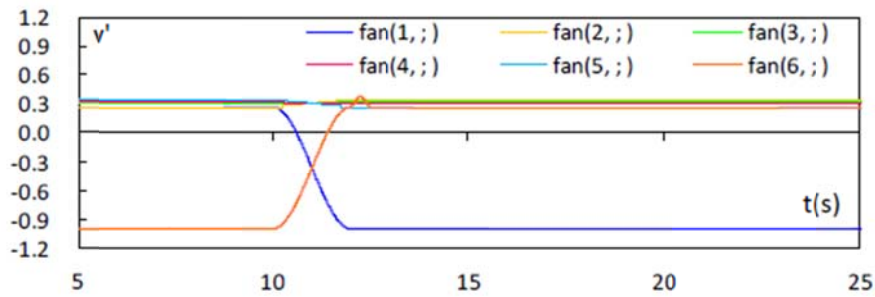


(A) 入力波形

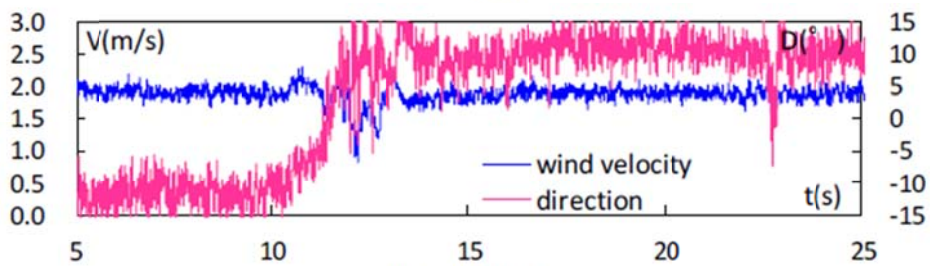


(B) 計測気流

図 6.20 波形番号16



(A) 入力波形



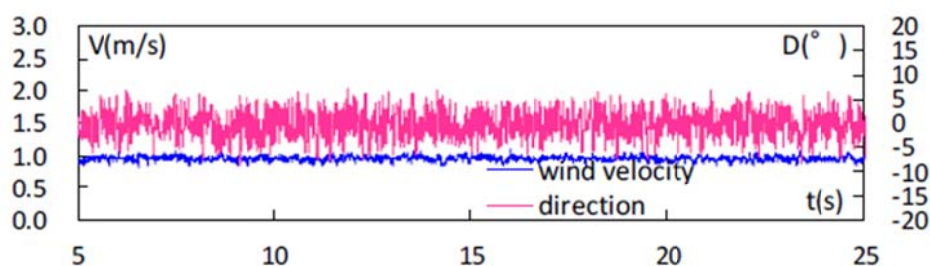
(B) 計測気流

図 6.21 波形番号17

これらの試行錯誤を経て、本研究で新たに作成した波形の入力電圧と測定気流及び、風圧実験で主に使用する波形を図6.22～6.30に、一覧を表6.2示す。これらの波形は実験パラメータで触れるが、瞬間的な風速・風向の変化が構造物に対してどのような影響を及ぼすかを把握するために、風速・風向の変化の各組み合わせと風向変化を逆にした場合の計9タイプの気流により実験を行うものとする。

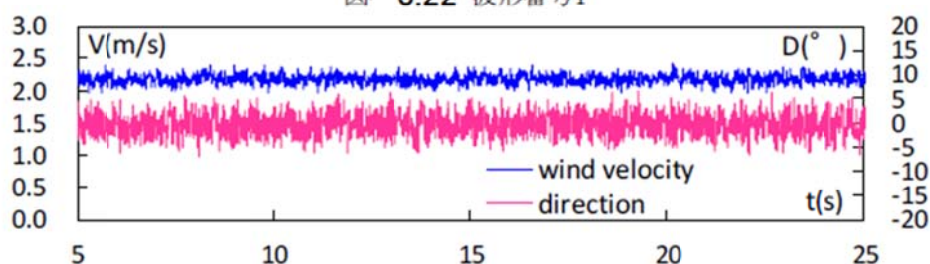
表 6.2 実験用波形

stream type	$\Delta U(\text{m/s})$	$\Delta D(^{\circ})$	$\Delta t(\text{s})$	remarks
st.1	-	-	-	stationary (0.9m/s)
st.2	-	-	-	stationary (2.18m/s)
st.3	1.23	-	1	velocity only
st.4	-	23.38	1	direction only
st.5	-	24.72	1	direction only (reverse)
st.6	1.53	21.95	1	vel & dir
st.7	1.16	18.81	1	vel & dir (reverse)
st.8	-	21.01	2	direction only
st.9	-	21.78	2	direction only (reverse)



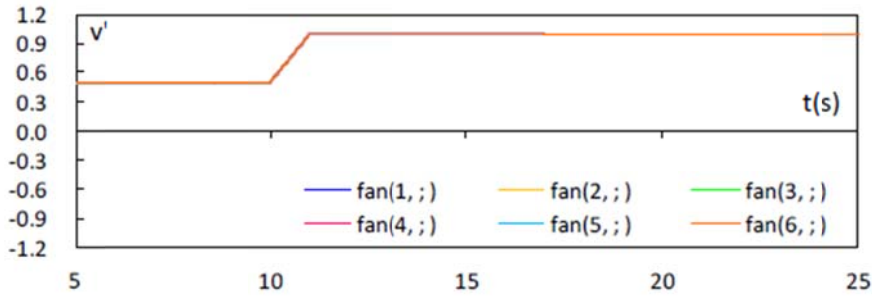
(A) 計測気流

図 6.22 波形番号1

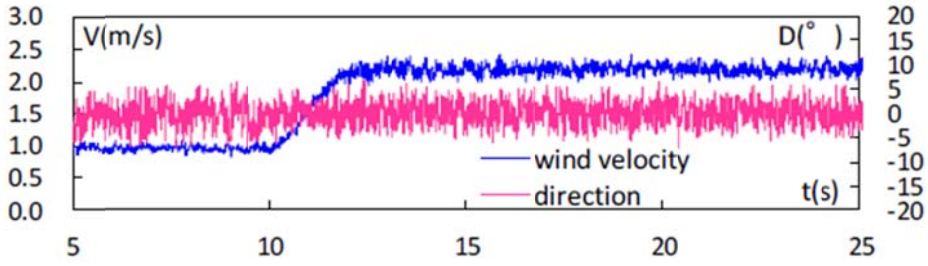


(A) 計測気流

図 6.23 波形番号2

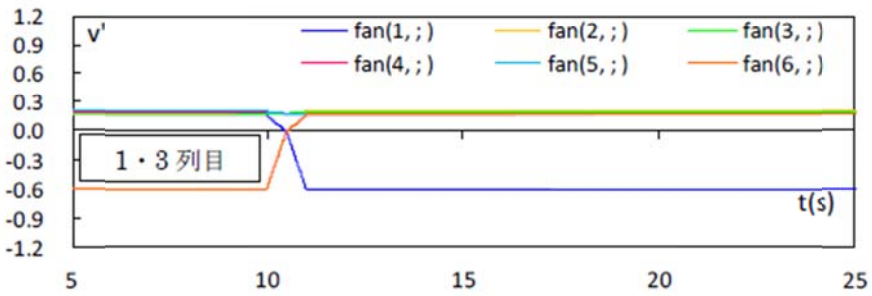
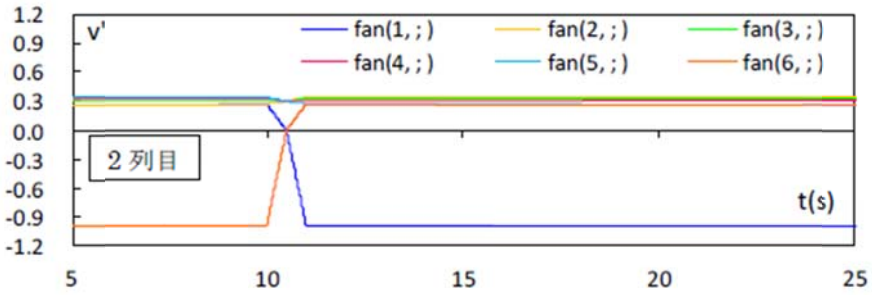


(A) 入力波形

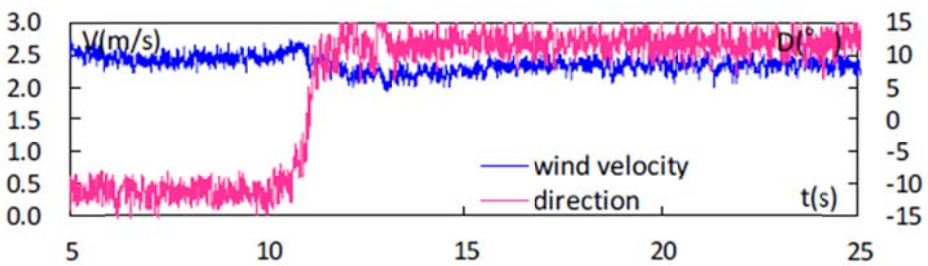


(B) 計測気流

図 6.24 波形番号3

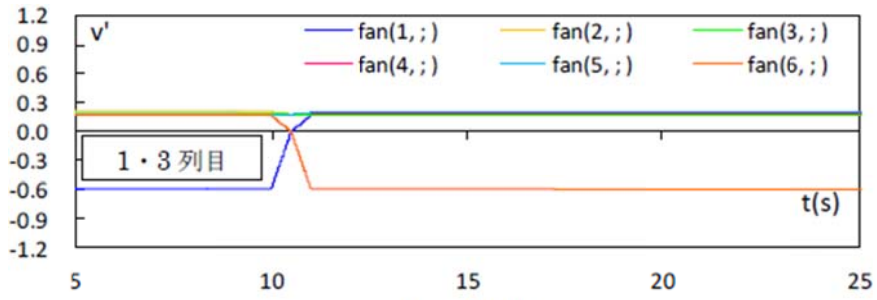
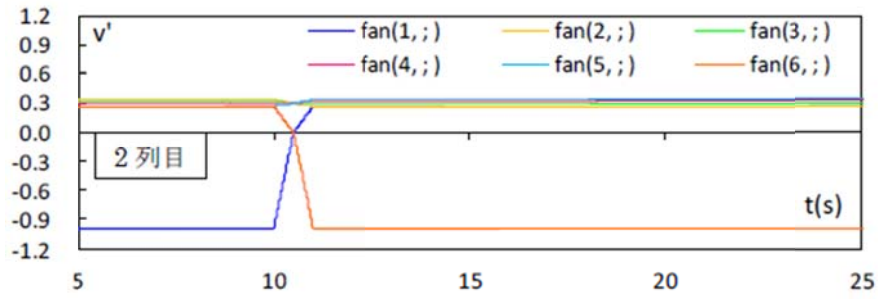


(A) 入力波形

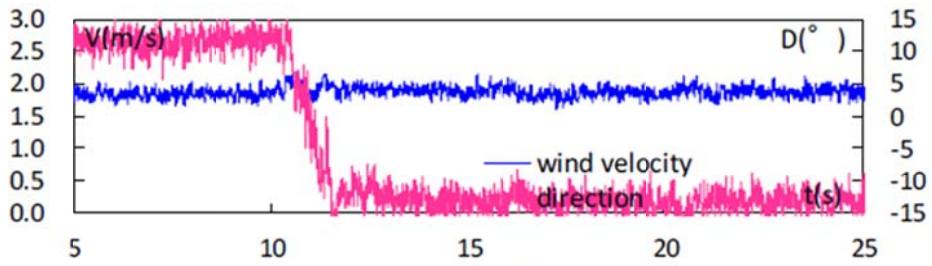


(B) 計測気流

図 6.25 波形番号4



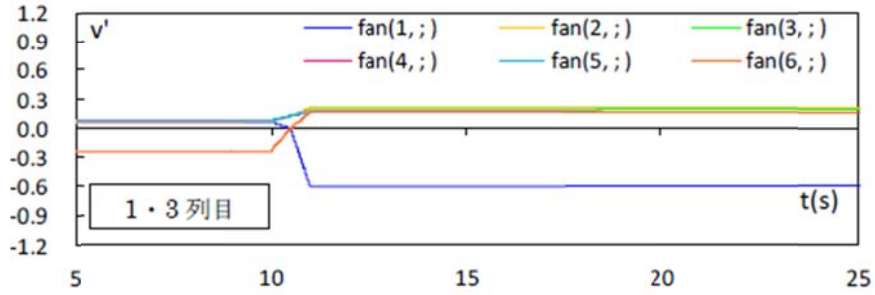
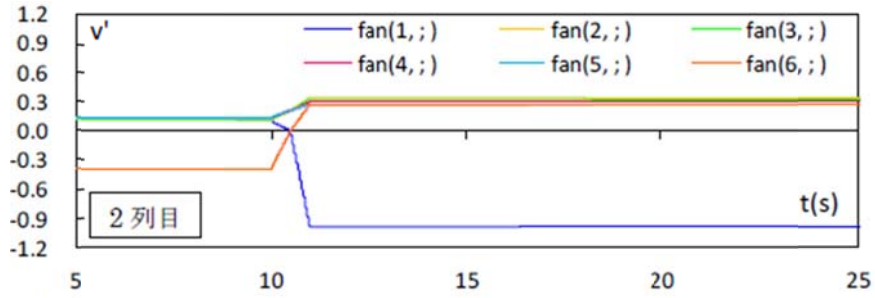
(A) 入力波形



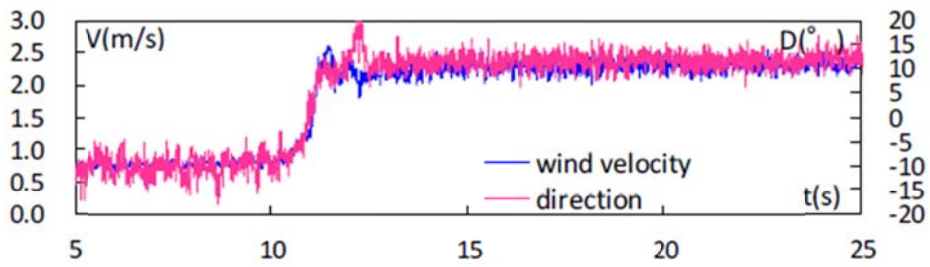
(B) 計測気流

図 6.26 波形番号5



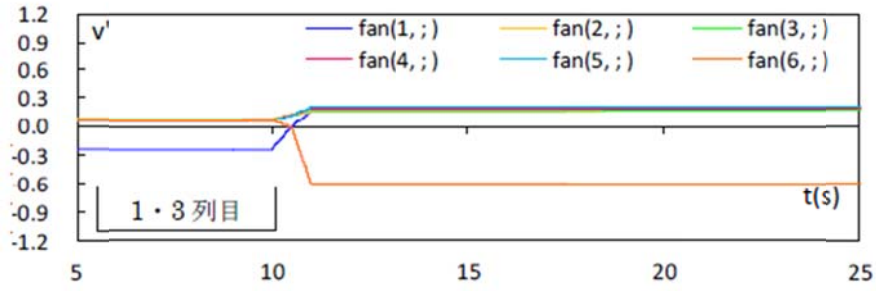
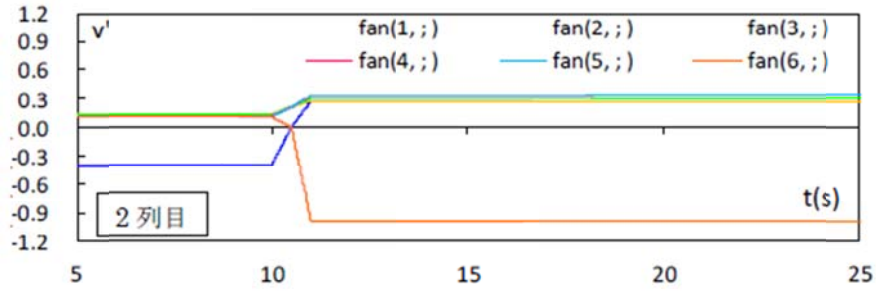


(A) 入力波形

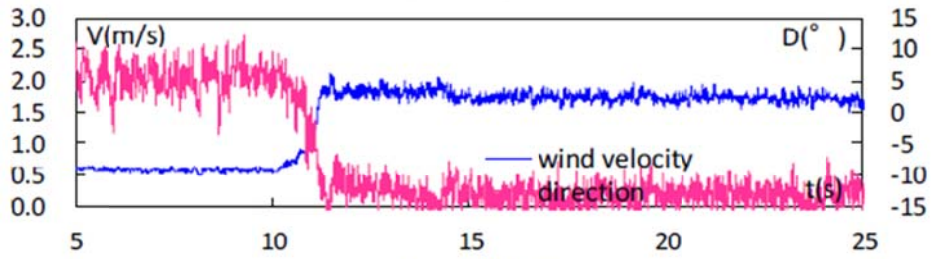


(B) 計測気流

図 6.27 波形番号6

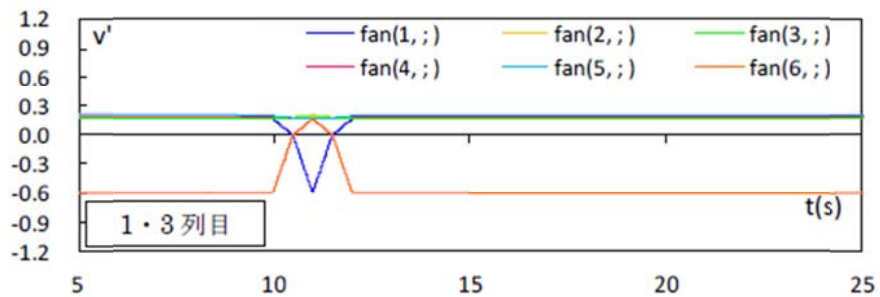
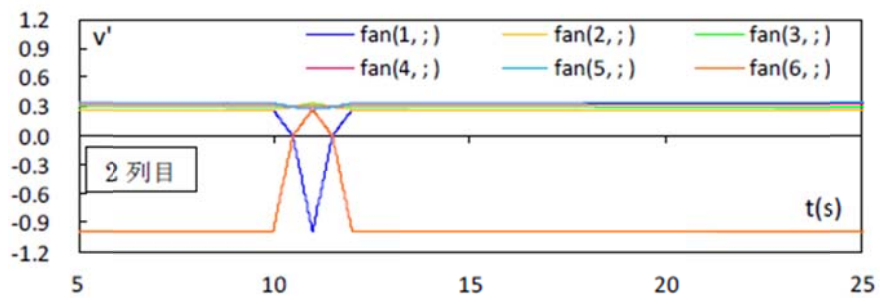


(A) 入力波形

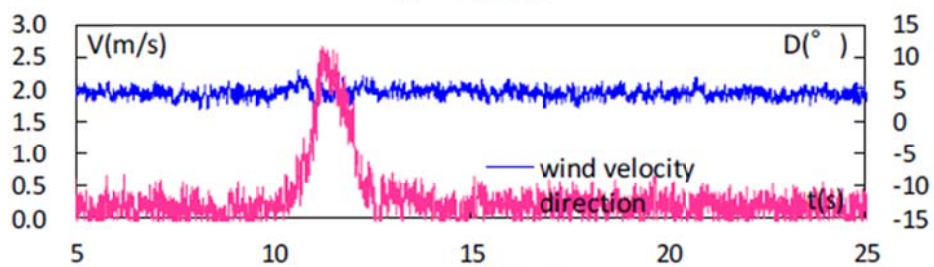


(B) 計測気流

図 6.28 波形番号7

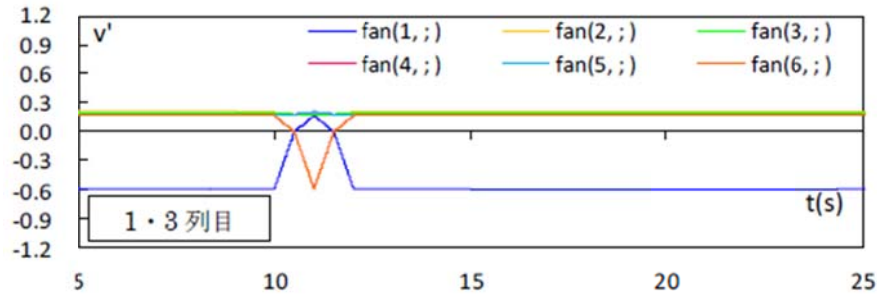
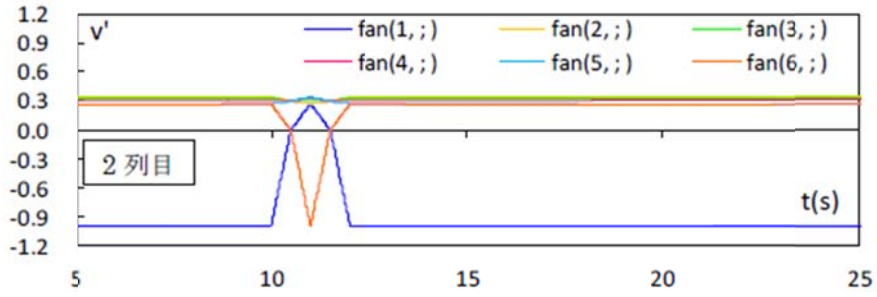


(A) 入力波形

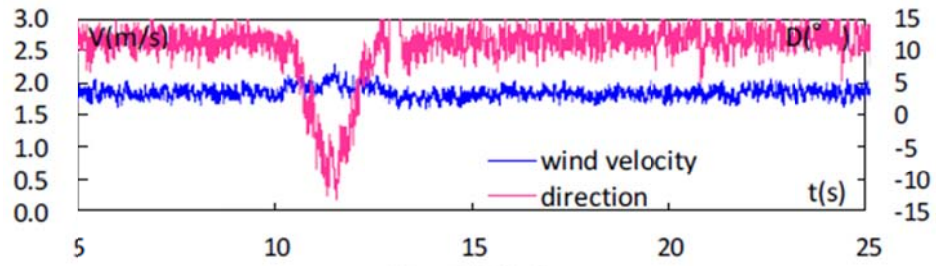


(B) 計測気流

図 6.29 波形番号8



(A) 入力波形



(B) 計測気流

図 6.30 波形番号9

## 6. 2 模型周辺での気流分布の把握

これまでの研究では12番の点において安定して気流が変化していれば、模型の周囲でも同様な気流の変化が生じているものとして実験を行ってきた。しかしながら、限られた空間を流れる気流が全て一様な変化をしていると仮定することは非現実的である為、作成した気流の確認を行う。模型設置位置を中心に25mm 間隔計 25 点で測定する。風速測定点、風圧模型周辺でどのような気流が発生しているか計測を行う。計測地点の模型・測定洞内との関係を図 6.31 に、計測結果をベクター・コンター図(surfer10 を使用)で示した物を図 6.32 に示す。風速は 0.3m/s 以内の範囲に収まっており、風向もほぼ一様に変化している事が分かる。この事から、模型周辺では風速・風向共に一様に変化しているものとする。

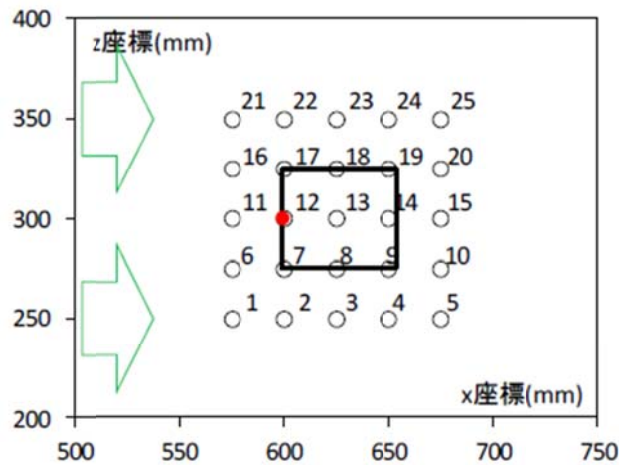


図 6.31 模型周辺の計測地点

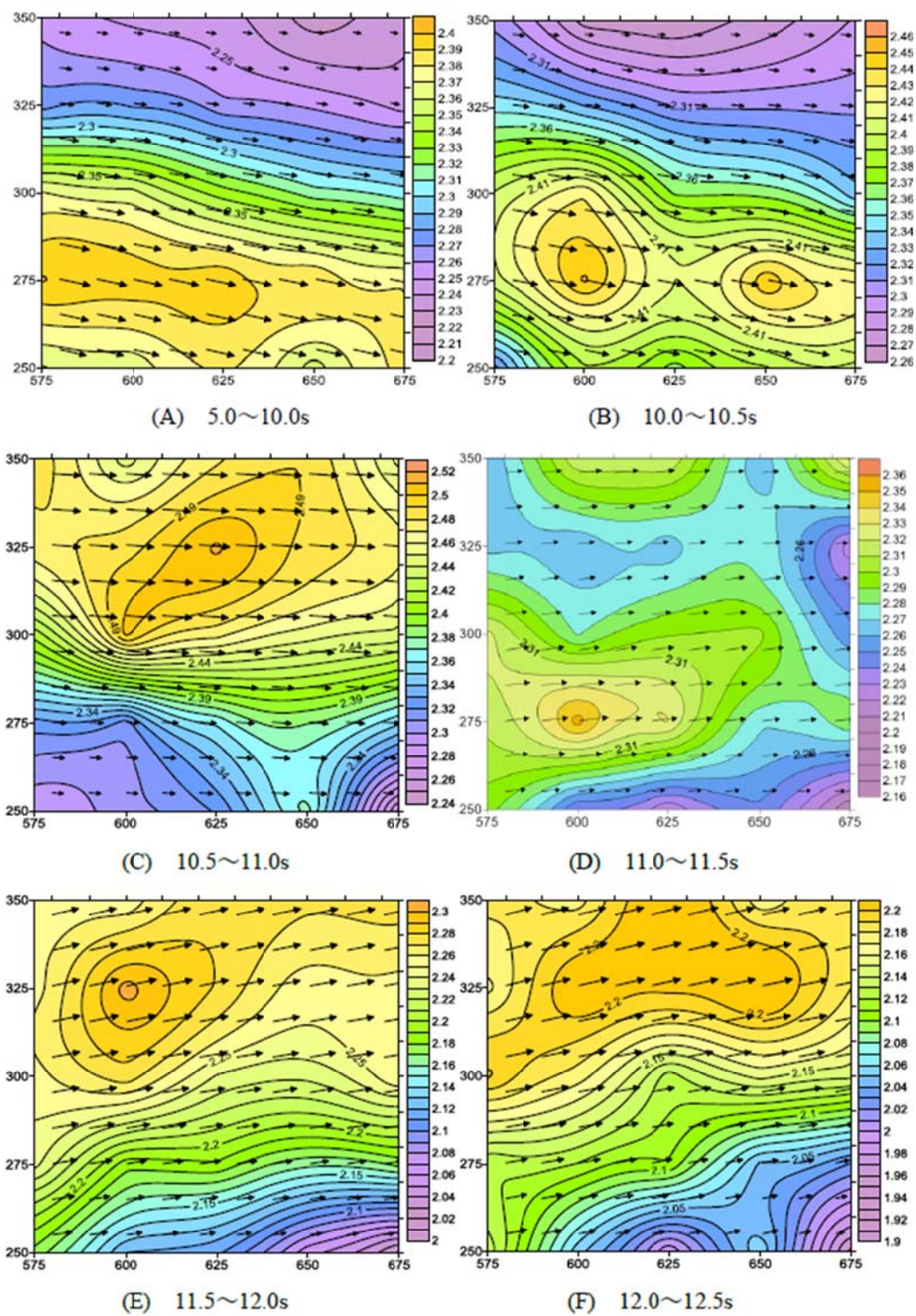


図 6.32 模型周辺の気流分布

## 6. 3 圧力測定の概要

本章では、これまでの実験で得た知見をもとに、風洞内に模型を設置して、非定常な風向変化時の模型の表面風圧を測定する。

1 列複数ファン風洞における実験結果の 1 例を図 6.33 に示す。この結果は NDU の 2 秒と 10 秒の変化における角柱模型を 15 度傾けておいたときの表面風圧の時刻歴変化である。2 秒で変化する場合には、風向が変化する 30 秒時点に特徴的なピークが得られることを確認している。

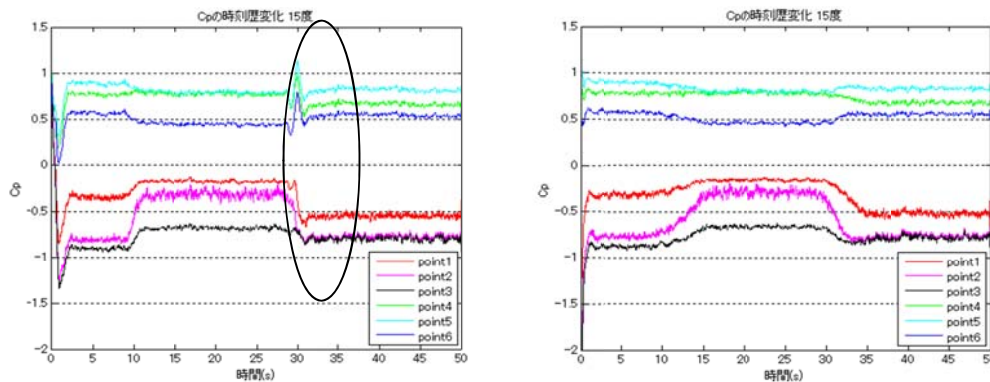


図 6.33 1 列複数ファン風洞における風圧係数の時刻歴変化の 1 例

今のところ、1 列複数ファン風洞における実験ではこのような現象を定量的に解明することはできなかった。その原因として、この実験は一般的に行うような定常状態における測定実験ではないため、一般的実験方法が通用しない部分があり、そのために実験手法自体にいくらかの疑問が残るといことがあげられる。本章では、3 列になったことを生かして実験手法を改善し、より正確な実験結果を元に結果の考察を行う。

本実験においては、風圧力の評価に、表面圧力を基準速度圧で除した風圧係数

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho U_R^2} \quad (6.1)$$

を用いる。ここで 5 章で求めた結果に基づき、表面圧力  $p$  の求め方を決定し、また、基準風速  $U_R$  としては 4 章の実験で求めた風速を利用する。

### 6. 3. 1 2次元模型と模型の設置位置

表面圧の測定には角柱模型と円柱模型を用いる。本実験では、模型に作用する気流の風速と静圧を、風圧力と同期した形で測定する必要がある。本風洞では2章で確認したように、 $y=100, 300, 500\text{mm}$ での測定がほぼ同じ結果が得られることが分かっている。よって、模型の表面圧力の測定を  $y=300\text{mm}$  の地点で行い、同時に  $y=500\text{mm}$  の地点で風速と静圧を測定するのがよさそうである。測定模型をそれぞれ図 6. 34 と図 6. 35 に示す。それぞれの模型は風洞内の2次元的なふるまいを把握するため、風洞の幅と同じ長さを持っていることが理想的ではあるが、ここではファン1列分の幅で風速と静圧を計測することにし、 $400\text{mm}$ の長さとする。それぞれ  $y=300\text{mm}$  の風洞の中心にあたる場所で中央部に圧力測定孔を持っている。圧力測定孔は、角柱模型では各面の端と中央部の計12点、円柱模型では22.5度ごとに一周分の計16点を取り付けられている。角柱模型の圧力測定孔を point1~point12、円柱模型の測定点は風上側を0度として、 $p_0 \sim p_{337.5}$  と名付ける。圧力測定に用いる機器は4章と同様のシステムを用いた。

次に、模型の設置状況について図 6. 36 に示す。また、2次元的に配置を見た場合を図 6. 37 と図 6. 38 に示す。3章で求めた気流によれば、str7 と str10 は  $(x, y, z) = (600, 300, 300)$  を基準点、str5 は  $(x, y, z) = (900, 300, 300)$  を基準点としている。よって風速と静圧を測定するにはピトー管を str7 と str10 では  $(x, y, z) = (600, 500, 300)$ 、str5 では  $(x, y, z) = (900, 500, 300)$  の位置に設置することがよいと考えられる。しかし、本実験のように静圧場が非定常に大きく変化する実験においてはピトー管では正確に風速を測定することができない。そこで、風速の測定にはI型プローブ熱線風速計を用い、静圧は風洞側面の圧力測定孔の値を用いることにした。しかし、本実験にて測定した風速値は機器の不具合の影響で乱れてしまっていたため、基準速度圧としての計算には、3章にて測定した風速データを計算によって同期させて用いた。

角柱模型は設置角度によって生じる表面圧が異なるため、設置角度を0度から45度まで5度ずつ変えて、合計10ケースの測定を行った。また、円柱模型についてもより詳細に測定データを得るために、0度そのまま測定したものと、11.25度傾けての測定、22.5度傾けての測定、33.75度傾けての測定、45度傾けての測定、合計5ケースについて測定した。

なお、模型の風洞に対する閉塞率は、風洞側面に設置された模型支持台も含めると、円柱模型の場合で6.47%、角柱模型は0度の設置角度で6.47%、45度傾けて設置した場合に最大の8.77%となっている。



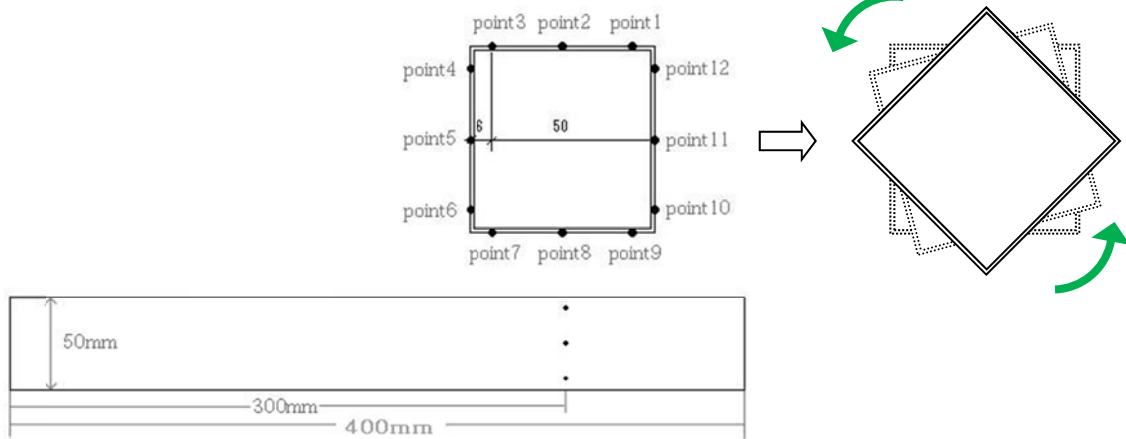


図 6.34 角柱風圧模型

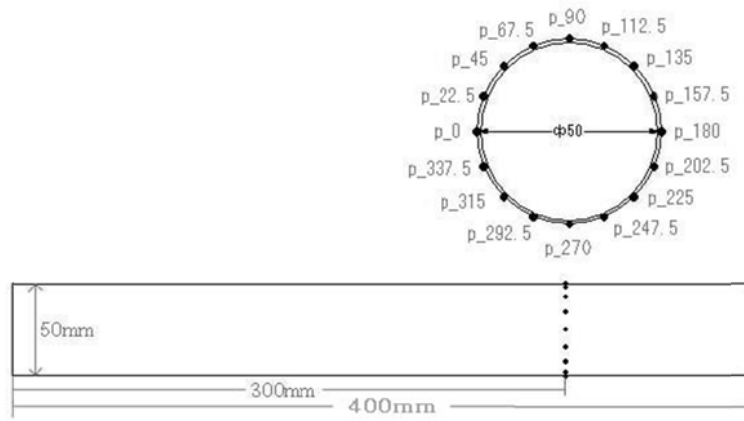


図 6.35 円柱風圧模型

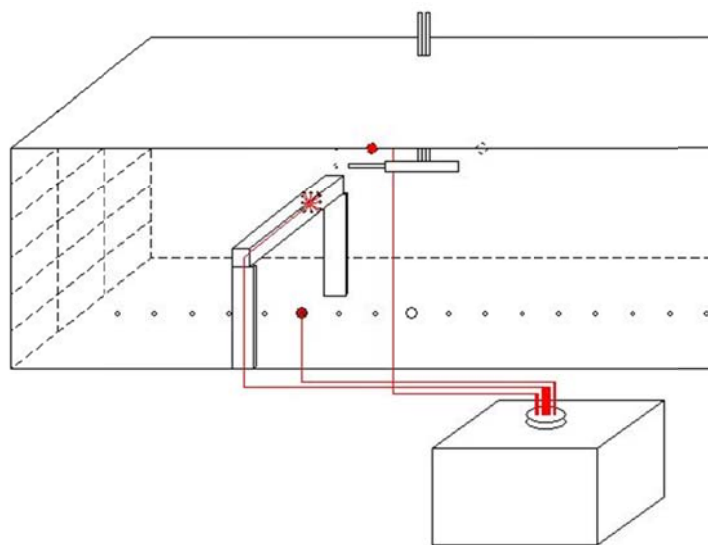


図 6.36 圧力測定模型の設置状況

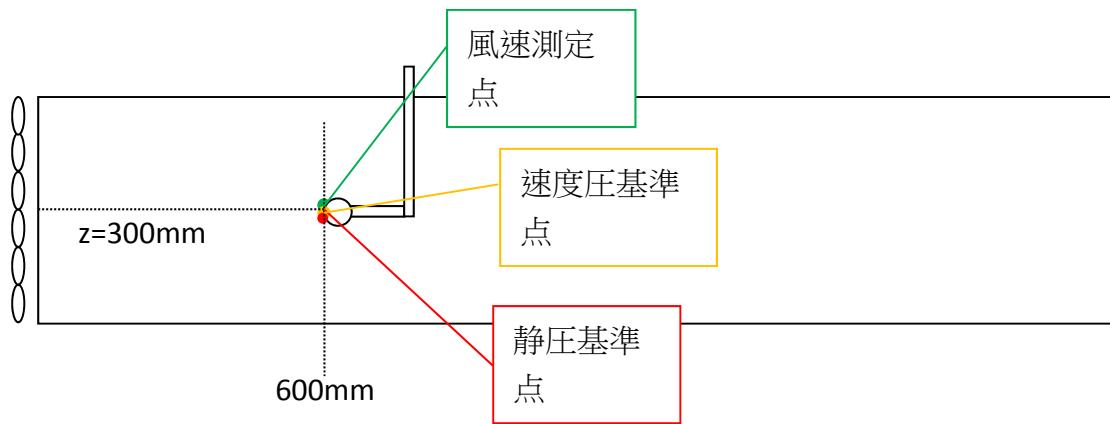


図 6.37 str7,str10 の模型設置時の xz 平面

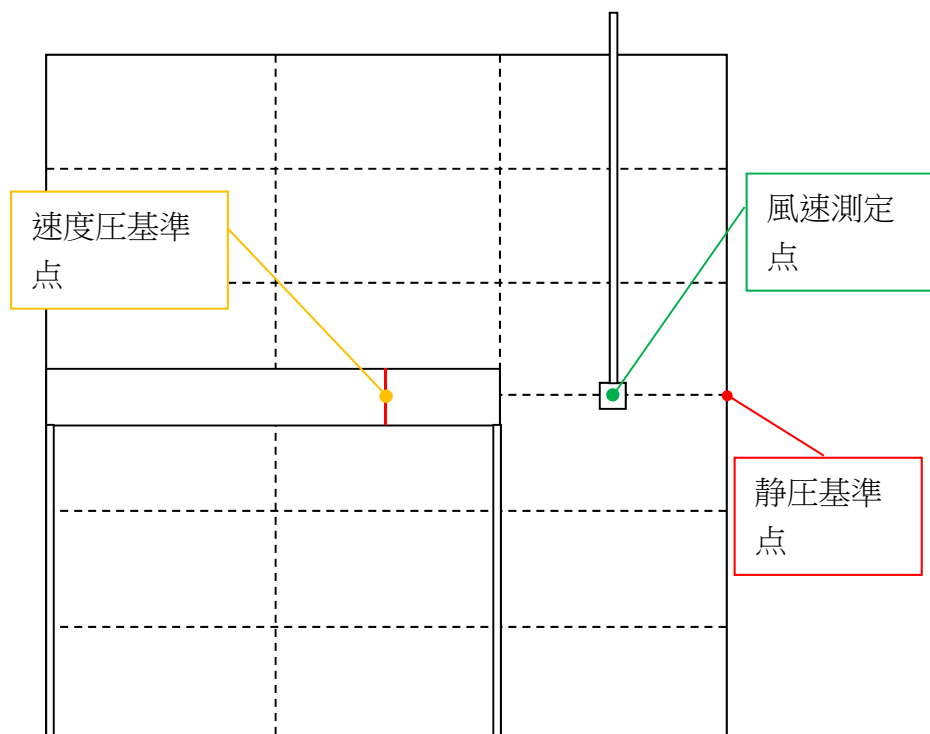


図 6.38 str7,str10 の模型設置時の yz 平面

### 6. 3. 2 各種係数の計算

表面圧力の評価は風圧係数によって行う。一般的な式は次式に従う。

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho U_R^2} \quad (6.2)$$

$p$  : 表面圧力 (Pa)

$\rho$  : 空気密度 (気温 15 度の実験においては  $1.22\text{kg/m}^3$ )

$U_R$  : 基準風速 (m/s)

この式に静圧を代入して、

$$C_p = \frac{p' - p_s}{\frac{1}{2}\rho U_R^2} \quad (6.3)$$

この式を時間的に拡張すると、

$$C_p(t) = \frac{p'(t) - p_s(t)}{\frac{1}{2}\rho U_R(t)^2} \quad (6.4)$$

この式をもって、各時点における風圧係数を求める。

また、模型全体にかかる力の評価に風力係数  $C_{FX}$  と  $C_{FY}$  を用いる。ここでは、模型に対する座標系  $XY$  を図のように定めている。

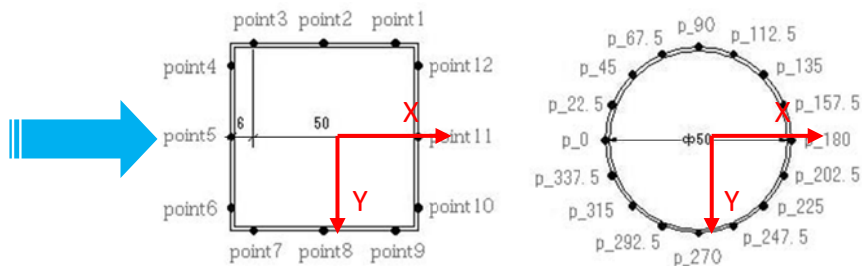


図 6.39 模型の座標設定

風力係数は次式によって求める。

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho U_R^2 L} \quad (6.5)$$

$C_F$ : 風力係数

$F$ : 風力(N/m)

$L$ : 代表長さ(0.05m)

ここで、 $F$  にあたるものとして、図 6.39 の座標系に基づけば、それぞれ角柱模型では

$$F_X = (12 \times p_{p_4} + 36 \times p_{p_5} + 12 \times p_{p_6} - 12 \times p_{p_{10}} - 36 \times p_{p_{11}} - 12 \times p_{p_{12}})/1000 \quad (6.6)$$

$$F_Y = (12 \times p_{p_1} + 36 \times p_{p_2} + 12 \times p_{p_3} - 12 \times p_{p_7} - 36 \times p_{p_8} - 12 \times p_{p_9})/1000 \quad (6.7)$$

円柱模型では、

$$F_X = \sum p_{p_k} \times \cos(k) \times 50 \times \pi / 1000 \quad (6.8)$$

$$F_Y = \sum p_{p_k} \times \sin(k) \times 50 \times \pi / 1000 \quad (6.9)$$

となる。なお、これらの式では、圧力  $p$  は 4.1 式に従うが、いずれの場合においても静圧  $P_s$  が打ち消しあう。そのため、風力  $F_X$  ,  $F_Y$  は、基準とする静圧や風速にとらわれずに評価することができる。なお、5.5 式についても時間的に拡張され、

$$C_F(t) = \frac{F(t)}{\frac{1}{2}\rho U_R(t)^2 D} \quad (6.10)$$

となる。風力  $F_X$  ,  $F_Y$  が基準静圧に左右されないため、風力係数  $C_F$  も基準静圧に左右されずに評価することが出来る。この式に 6.6 式から 6.9 式を代入することで、角柱模型および円柱模型に作用する風力を、風力係数  $C_{FX}$ ,  $C_{FY}$  の時刻歴として求める。

## 6. 4円柱、角柱における基本断面の風圧測定実験結果

円柱模型の直径は50mm、風圧測定点は16点あるので、模型を $11.25^\circ$ 回転させる事により、計32点での風圧変化を測定する。本実験では一般的な風圧測定実験とは違い、風速、風向が測定胴の同一断面内で圧力が異なる為に、x, z軸を同じくする測定胴壁面での圧力を基準静圧として測定圧力より引く事で、計測値から風速の変化の影響を除いた圧力変動を計測するという、既往の研究で報告5)されている手法を用いる。

これにより風向変化のみによる圧力の変動を測定することが可能となる。風圧測定は気流の場合と同様に1000Hzで30s間の計測2回によるアンサンブル平均によるものとする。

st. 3による風圧係数の気流変化前後の平均値と時刻歴変化の様子を図6.40に、st. 4によるものを図6.41に示す。風速上昇のみのst. 3及び風向変化のみのst. 4の結果に着目すると、平均風圧係数では気流変化前後の風圧係数分布の違いがはっきりしており、基準静圧を壁面で測定することにより、気流変化後に風圧係数が目立った変化をしていない事から、風速上昇による風圧係数への影響が打ち消されている事が分かる。又、風圧係数を時刻歴で検証すると、気流の変化により風圧係数が変化している様子が把握できる。

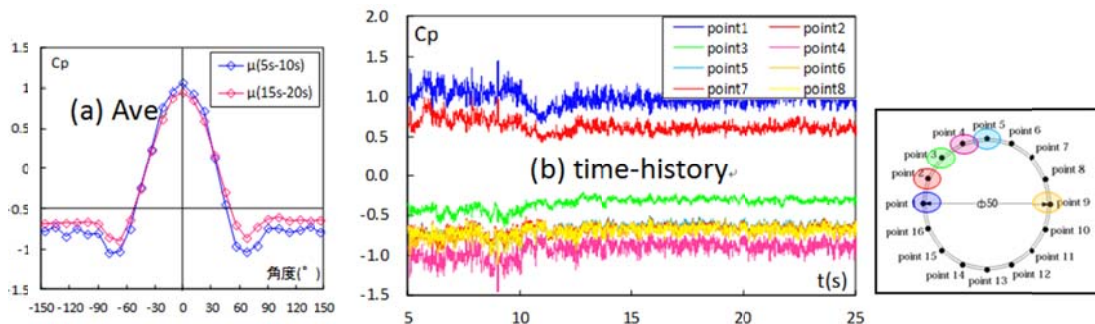


図 6.40 気流 3 による風圧係数

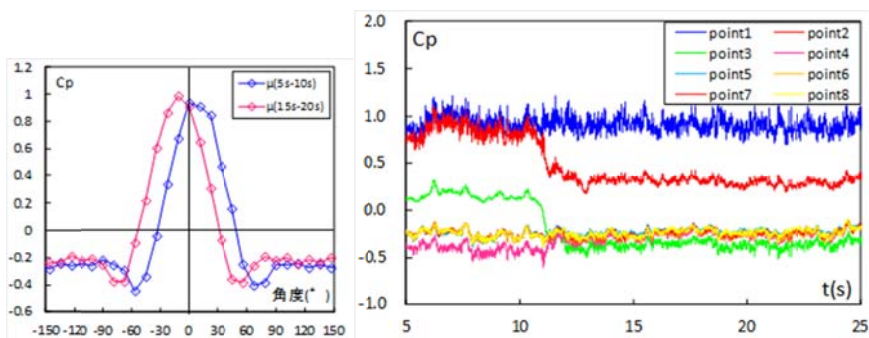


図 6.41 気流 4 による風圧係数

円柱模型による実験により、風圧係数への風速の変化を取り除く事が可能である事や、実験気流の風向変化による影響が明確に計測できる事が分かったので、同様の気流の下、角柱模型による風圧実験を行う。設置する角柱模型の角度は0~45°まで5°毎とし、計90通りの測定を行う。模型の風洞に対する閉塞率は、円柱模型の場合で2.78%、角柱模型は0度の設置角度で2.78%、45度傾けて設置した場合に最大の3.93%となっている。一般的に正方形断面では風向角15°で側面最大負圧-1.2を取る事が知られている。

そこで、実験結果から、風向が短時間で変化することで瞬間的に大きな負圧を計測した例の、気流変化前後の平均値と時刻歴変化の様子を図6.42に示す。また該当する結果一覧をTable.6.3に示す。又、気流は約20°の風向変化をしているので、模型の設置角度を考慮すると各時刻歴風圧係数を連続的に重ね合わせる事で、およそ110°の風向変化が生じた場合の風圧係数の推移が把握できる。その概要を図6.43に、風圧係数の推移を図6.44に示す。

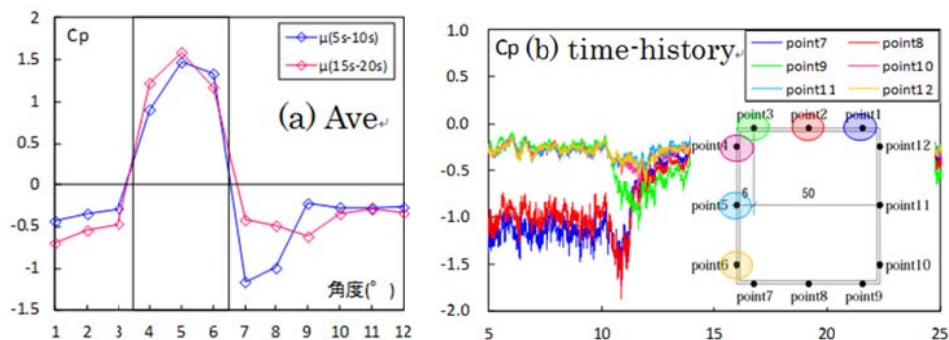


図 6.42 模型角度5°気流5による風圧係数

Table.6.3 大きな負圧の組み合わせ

model angle	st.
0°	6
5°	5
10°	5,6,7,8
15°	5,7,9
20°	9

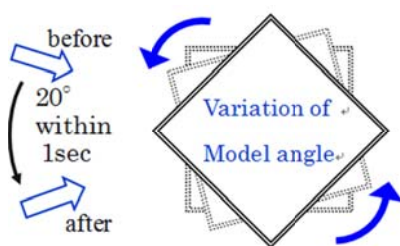


図 6.43 連続的な風圧係数の変化の把握手法

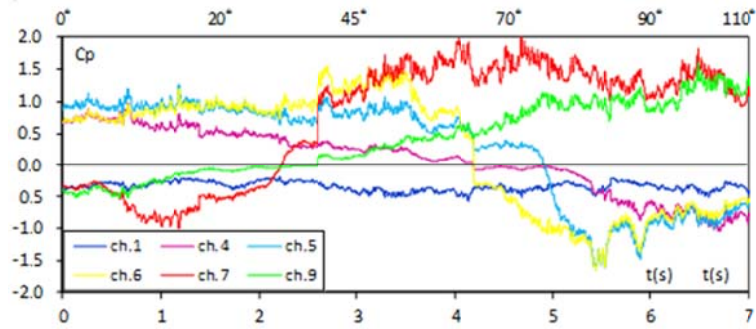


図 6.44 各測定点の風圧係数の角度毎の推移

風圧実験により得られた風圧力から、角柱模型の風力係数を算出する。この場合、静圧が打ち消しあうため、風力  $F_x$  ,  $F_y$  は、基準とする静圧や風速にとらわれずに評価することができる。又、一般に風力係数は風方向に対して算出するが、本研究では非定常に風向が変化する事から、風圧模型を軸に  $x$  方向風力、 $y$  方向風力という形で算出する。以下に  $x, y$  方向風力係数及びねじりモーメント係数の算出式を示す。模型の軸については図 6.45 に示す。

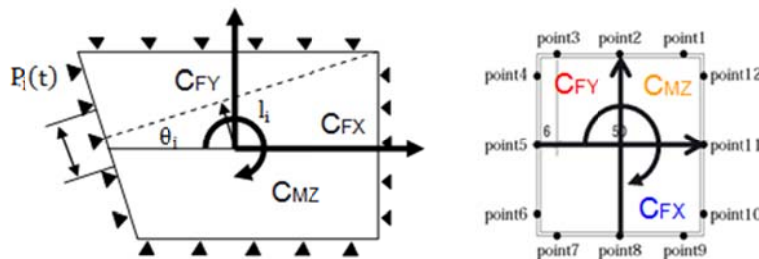


図 6.45  $x, y$  方向風力の座標

模型設置角度による風力係数の違いについて st.4(風向のみ変化)を例に図 6.46 に示す。実験結果について、短時間で風向が変化的ことで、 $x, y$  方向風力係数やねじりモーメントにオーバーシュート現象が発生するか検証を行う。この場合のオーバーシュート現象とは気流の変化直前と直後に大きな値が生じている場合とする。

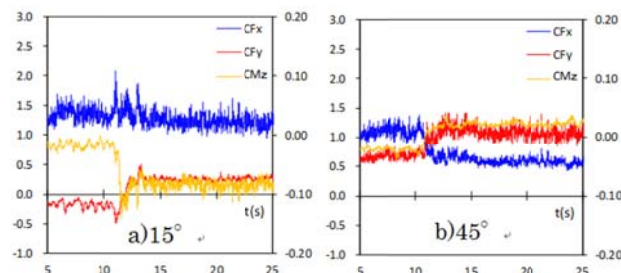


図 6.46 気流 4 の角度毎の風力係

本実験では気流変化を約 1s としたが、明確な風力のオーバーシュート現象が確認できた例は稀であり、気流変化前後で  $CF_y \cdot CM_z$  のオーバーシュート現象を確認した例を図 6.47 に、風向変化中に  $CF_y$  の値が瞬間的に変動する例を図 6.48 示す。算出した  $x, y$  方向風力を風圧係数の際と同様に重ね合わせる事で求めた風力係数の角度毎の推移を図 6.49 に示す。又その際の時刻歴と風向変化との対応を図 6.50 に示す。

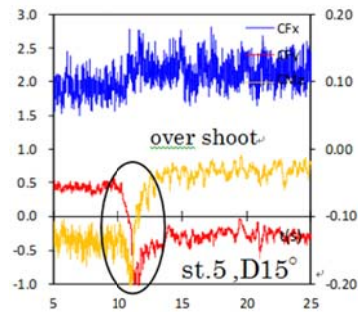


図 6.47 オーバーシュート事例

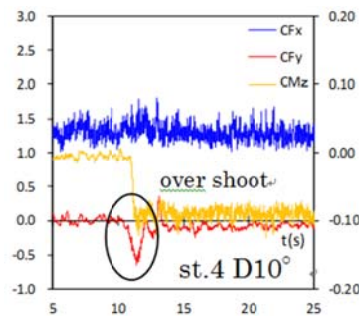


図 6.48 風向変化による作用

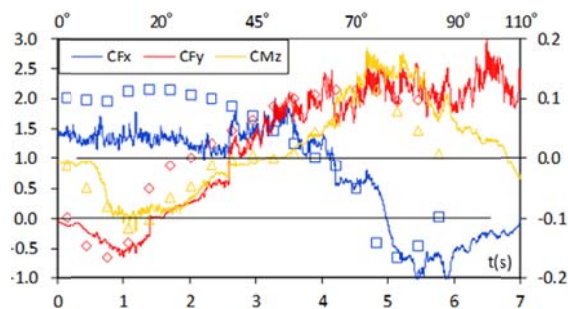


図 6.49 風力係数の角度毎の推移



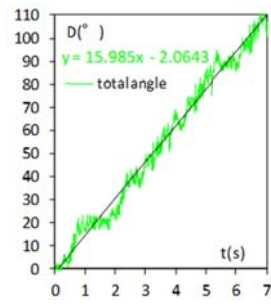


図 6.50 時刻歴と風向の対応



## 第七章

### 結論

## 7. 1 結論

本章では、各章にて得られた知見、成果をまとめる。本研究における研究背景を述べ、本研究の立ち位置を明確にした。また、既往研究における結果を述べたうえで、本研究の目的として、

- 1) 風洞の基本的性質の解明
- 2) 3列複数ファン風洞を用いた非定常風向変化気流の作成
- 3) 3次元の実験環境における非定常な気流の下での実験方法の確立
- 4) 非定常な風向変化が建物風圧特性に与える影響の解明

の4つを、それぞれ平均値成分に着目して明らかにすることを定めた。

新設された3列複数ファン風洞の基本的事項について取り上げた。風洞設備の概要を説明するとともに、一様入力波を与えた中での実験の結果を取り上げ、測定胴内の気流の形成に縮流胴を含めたファンの形状が大きく関わってくることを明らかにした。また、ファンへの入力電圧と得られる風速が線形の関係にあることを確認し、1列複数ファン風洞との違いを明らかにした。ここで、目的1)を達成した。

1列複数ファン風洞における実験手法を参考に、より有用な風向変化気流を作成するべく実験を行った。有用な風向変化気流の条件とは、

1. 圧力模型を設置する範囲で風速の分布が一定であること
2. より大きな風向変化角度が得られること
3. 風向が変化する際に風速が変化しないこと

である。ここでは、角度を持たない定常状態である Neutral(以下:N と略す)、下向きの風向を持つ状態である Down(以下:D と略す)、上向きの風向を持つ Up(以下:U と略す)の3つの定常状態を定め、それぞれ str5, str7, str10 の3つのケースでN、D、Uを作成した。それぞれの状態間を変化させることで非定常な風向変化を持つ気流を作成し、-5度から5度の範囲で変化するNDU5及びNUD5、-7度から7度の範囲で変化するNDU7及びNUD7、-10度から10度の範囲で変化するNDU10及びNUD10と定めた。それぞれ変化時間を2, 4, 6, 8, 10秒の5パターン検討し、合計30通りの入力波を作成した。その結果、最大約19度の風向変化が起こせることを確認した。ここで目的2)を達成した。

非定常な変化時に風洞内の静圧場がどのように変化するかを明らかにするべく、風洞床面と風洞壁面に圧力測定孔を設けて実験を行った。まず、2, 4, 6, 8, 10秒のそれぞれの時間で、ファンへの入力電圧が0Vから0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4Vまで立ち上がる入力波を作成し、風速が非定常に変化する場における測定胴内の静圧場の変化を計測した。その結果、定常時には、風洞内にファンからの距離におおむね比例し、入力電圧の2乗に比例する負圧が発生することを確認した。また、非定常な風速増加時及び風速減少時に、ファンからの

距離に比例して小さくなり、入力電圧に比例して大きくなり、変化時間にほぼ反比例の関係にあるピーク値を計測した。そして、このピーク値の耐風工学上の意味を考察し、その危険性を示した。

また、作成した風向変化気流の下で静圧がどのような挙動を示すかの実験を  $x=500\text{mm}$  の地点にて行い、それぞれの測定点における数値が一致しないことを確認した。このことから、次に行う圧力実験において、正確な実験を行う上で最適な静圧基準点を選定した。最後では、非定常な風向変化が建物に与える影響を把握するべく、風洞内に角柱模型及び円柱模型を設置して、作成した気流の下で圧力測定実験を行った。

## 7. 2 今後の展望

本研究において、非定常な風速、あるいは風向の変化時に、模型に大きな圧力が発生しうることを確認した。この原因として、風洞内の静圧場の分布、及び時間的変化が大きく影響してくると考えられる。よって、非定常変化時の風洞内部における静圧場について、より詳細に実験を行うことで、これらの圧力の変化について、体系的にまとめることが出来ると考えられる。また、風洞における実験だけではなく、自然風中における風速・風向及び静圧場のあり方について、理論的に詰めるか、実測によって明らかにする必要があると考える。

本研究では、池内等によって述べられているような非定常な風向変化が与える危険性についてはあまり認められなかった為、目的が達成できたとは必ずしも言えなかった。その一因として、本研究は定常的な考え方において含まれる、乱れの要素についてあまり言及していなかったことがあげられる。パワースペクトルなどの乱れ成分の影響も組み込んで考えることでより現象の解明に近付くことが出来るのではないかと考える。

乱れを考慮した実験を行う上では、具体的な模擬対象を定めることが有用であろう。台風や竜巻等の具体的なケースを想定し、乱れ成分を含めた模擬を行うことで、非定常性が及ぼす危険性について言及する可能性があると考えられる。

## 参考文献

1. 鈴木, 田村, 眞田, 山本: 正方形平面建物の風応答・風圧特性に対する風向の非定常性の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 550 号, 23-30, 2001
2. 池内, 谷池, 谷口: 瞬間的な風向変化により外装材に作用する風圧性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 563 号, 61-66, 2003
3. 潟山, 森, 木村, 久保, 加藤: 風向変動風洞の風向変化性能の検討, 日本風工学会誌, No. 111, 221-222, 2007 4 30
4. Nishi, A., Kikugawa, H., Matsuda, Y. & Tashiro, D. : Turbulence control in multiple-fun wind tunnels, J. Wind Engi and Industrial Aero 67 (1997) 861
5. 神田, 岩崎, 喜々津: 複数ファン制御による乱流風洞の基礎的性質, 第 14 回 風工学シンポジウム (1996)
6. 喜々津, 神田, 岩崎: 複数ファンを用いた乱流風洞におけるココヒーレンスの模擬, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (関東), 1997
7. 喜々津: 複数ファンを用いた乱流風洞における模擬気流の作成, 1996
8. 外村光: 複数ファン風洞による風向変動を持つ気流の作成, 2007
9. 市原, 寺井, 神田: 複数ファン風洞による非定常な風向変動が 2 次元角柱の風圧特性に与える影響に関する研究 (その 1) 複数ファン風洞における風速・風向特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (仙台), 2009
10. 寺井, 市原, 神田: 複数ファン風洞による非定常な風向変動が 2 次元角柱の風圧特性に与える影響に関する研究 (その 2) 風向変動の下での 2 次元角柱の風圧特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (仙台), 2009
11. 寺井, 神田: 複数ファン風洞による非定常な風向変動が 2 次元角柱の風圧特性に与える影響に関する研究 (その 3) 円柱と角柱の風圧特性と気流の最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (北陸), 2010
12. 大熊武司, 神田順, 田村幸雄: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会, 1996
13. 大熊, 河井, 田村, 藤井: 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 財団法人日本建築センター, 2008
14. 社団法人日本鋼構造協会: 構造物の耐風工学, 東京電機大学出版局, 1997
15. 前田, 竹内: 非定常空気力特性の実験的解明 -その 1 突風作用時の非定常空気力特性-, 日本風工学会誌 第 35 巻第 2 号, 2010