

2007年度 修士論文

複数ファン風洞による風向変動を持つ気流の作成

Generation of Direction-Changing Flow by a Wind Tunnel with Multiple Fans

外村 光

Conomura, Hikari

東京大学大学院 新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

目次

1. 序論	p. 1
1.1 はじめに	p. 2
1.2 耐風設計の研究の変遷	p. 5
1.3 種々の風洞と複数ファン風洞の位置付け	p. 8
1.4 研究の視点と目的	p. 17
1.5 論文の構成	p. 18
参考文献	p. 19
2. 風洞の概要と気流性状	p. 21
2.1 風洞設備	p. 22
2.2 入力電圧と気流の関係	p. 24
2.3 様々な条件設定と風洞特性	p. 27
2.3.1 任意の回転数と平均風速分布との関係	p. 27
2.3.2 一様流での気流性状の確認	p. 30
参考文献	p. 32
3. 可視化実験による風向変化の予想	p. 33
3.1 はじめに	p. 34
3.2 実験概要	p. 35
3.2.1 測定方法	p. 35
3.2.2 測定ケース	p. 36
3.3 実験結果及び考察	p. 37
3.4 おわりに	p. 44
4. 風向変動実験	p. 45
4.1 はじめに	p. 46
4.2 実験概要	p. 48
4.2.1 測定方法	p. 48
4.2.2 測定ケース	p. 50
(1) ファンを停止した場合	p. 50
(2) ファンの停止時間を変えた場合	p. 52
(3) ファンを強めた場合	p. 53
(4) ファンの強弱を組み合わせた場合	p. 54
4.3 実験結果	p. 55
(1) ファンを停止した場合	p. 56
(2) ファンの停止時間を変えた場合	p. 74

(3) ファンを強めた場合	p. 78
(4) ファンの強弱を組み合わせた場合	p. 81
4.4 考察	p. 83
4.4.1 結果の考察	p. 83
(1) ファンを停止した場合	p. 83
(2) ファンの停止時間を変えた場合	p. 89
(3) ファンを強めた場合	p. 91
(4) ファンの強弱を組み合わせた場合	p. 93
4.4.2 実測の数値との比較	p. 95
4.5 おわりに	p. 97
参考文献	p. 98
5. 風圧実験	p. 99
5.1 はじめに	p. 100
5.2 実験概要	p. 101
5.2.1 測定方法	p. 101
5.2.2 測定ケース	p. 103
5.3 模型による気流性状の変化とピトー管位置の検討	p. 105
5.4 実験結果	p. 108
(1) 一様流の場合	p. 111
(2) 一様流に傾けた模型を置いた場合	p. 111
(3) 風向変化のある風に模型を置いた場合	p. 114
5.5 考察	p. 135
5.5.1 結果の考察	p. 135
(1) 一様流の場合	p. 135
(2) 一様流に傾けた模型を置いた場合	p. 138
(3) 風向変化のある風に模型を置いた場合	p. 140
5.5.2 実測の数値との比較	p. 144
5.6 おわりに	p. 147
参考文献	p. 148
6. 結論	p. 149

付録

梗概

■ ■ 1. 序論

1. 1 はじめに

天災の中で最も恐ろしいものは何か、という質問を友人 10 名にした。突然やってくるという理由で 9 人が地震であると答えた。今では想像することも難しいが、台風も昔は突然やってくるものであった。台風には直径が 1000km を上回るものも存在し、毎年必ず訪れるために、社会への影響は非常に大きいものであった。1960 年以前、台風の年平均死者数は 700 人にも及んでいた。天災の中で最も恐れられたものは、地震ではなく暴風雨であったのだ。1901 年 1 月の報知新聞において、「20 世紀の予言」¹⁾ というコラムが掲載されている。そこには、20 世紀中に実現すると思われる 23 項目の事柄が予言として書かれている。その中の「暴風を防ぐ」という項目において、“気象上の観測術進歩して天災來らんとすることは一ヶ月以前に豫測するを得べく天災中の最も恐るべき暴風起らんとすれば大砲を空中に放ちて變じて雨となすを得べしされば二十世紀の後半期に至りては難船海嘯等の變無かるべしまた地震の動搖は免れざるも家屋道路の建築は能く其害を免るゝに適當なるべし”という文が記されている。ここで着目したいのは、“天災中の最も恐るべき暴風”という言葉であり、風が恐れられていたことがよく分かるであろう。

1960 年以降、人的被害は激減した(図 1.1)。住宅などの質の向上もあるが、予報業務、情報伝達手段の進歩によるところが大きかったようだ。しかし、建物や農作物の被害は減少したとは言い難い²⁾ (図 1.2)。1991 年の台風 19 号での損害保険支払額は 5679 億円に達し³⁾、日本でひとつの自然災害で支払われた損害保険金の史上最高額を記録した(表 1.1)。2004 年は、例年の 3 倍にもあたる 10 個の台風が上陸し、損害保険の支払額は 7000 億円をこえた。2005 年から 2006 年にかけては、竜巻・突風による犠牲者が相次いだ。同じく 2005 年には、ハリケーン・カトリーナがアメリカのマイアミを襲い、国家経済を大きく揺るがすほどの損害をもたらした。驚くべきことに、世界的には自然災害による経済的損失の 85% が風による⁴⁾ ものなのだ。日本では 1960 年以降、台風の年平均死者数は 8 人程度、すなわち、1960 年以前の 1/100 にもなっている。しかし、この死者数の減少は、日本やアメリカのように先進国と言われる国の話であり、例えばインドでは、サイクロンによる死者が毎年 10 万人を超えている²⁾。強風災害の人類や社会へのインパクトは、このように世界的に見ても、

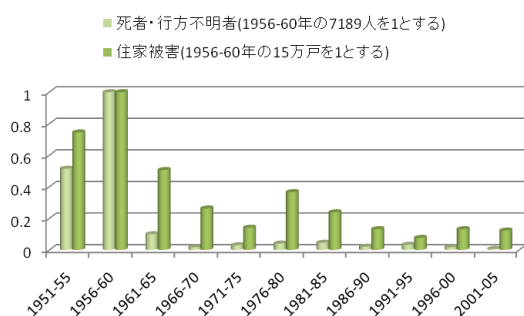


図 1.1 日本の台風における被害

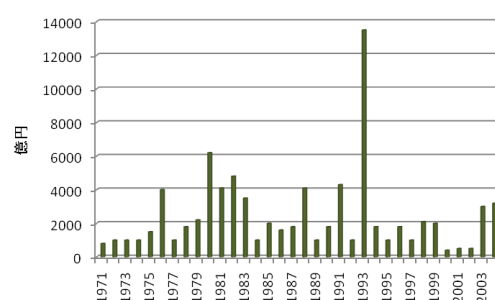


図 1.2 農作物の被害

極めて大きいということが分かる。また、竜巻やダウンバーストなどの突風は、現状では予報も難しく、建築物や交通機関に時として激甚な被害をもたらしている。さらに近年では、地球温暖化のため、台風も今までと異なる経路でやってくる。ガラス壁面の超高層建築物が林立する大都市や木造家屋が密集する住宅地を持つ日本では、強風災害を低減させることは特に重大な意味を持ち、都市や国家の安全保障の観点からも急務であるのだ。

表 1.1 台風の支払保険金

順位	災害名	年月日	支払保険金 (単位:億円)
1	台風19号(全国)	1991/9/26-28	5,679
2	台風18号(全国)	2004/9/4-8	3,874
3	台風18号(熊本、山口、福岡等)	1999/9/21-25	3,147
4	台風7号(近畿中心)	1998/9/22	1,600
5	台風23号(西日本)	2004/10/20	1,380

ところで、建物の風応答や風圧力を予測するためには、風洞実験を行うのが一般的である。これは、建物周りの気流状態や建物の形状、構造特性などを実測等に基づいて行えば、予測結果は比較的信頼しうるものであると判断されているためである。実験に基づく予測結果はばらつきのある実測値の平均値に近く、おおよそ合うことが確認されてきている⁵⁾。しかしその一方で、実測値のばらつきが大きいという結果が出ており、必ずしも十分とは言えないパラメータや評価手法に基づいて実測値を表現しているということが予想される。ばらつきが生じる原因は、いくつか提示されてきており、自然風のような外的要因と構造特性等の内的要因に大別出来る。その中でも、風洞実験の検討が比較的容易な要因、例えば、平均風速、乱れのスケールの鉛直分布や変動風速のパワースペクトル形状の影響などに関しては、実験をする上で独立に設定することが出来ないために、ひとつひとつの影響度合いを明確にすることは難しいが、組み合わせさせた状態において少しずつ解明されてきている⁵⁾⁶⁾。他方、実験で再現が難しい要因に関しては実験結果をもとにその要因の可能性として指摘する⁷⁾だけで、その影響の具体的な関わり方まで検討しているもの⁸⁾は少ない。例えば、風向の変動特性を風洞気流で再現する場合には、乱流中での変動風速により生じるランダム挙動を示す主流直角方向成分の再現にとどまっている。非定常な風向の変動特性は、いわゆる風向変化として区別され、前述した実測値のばらつきの原因として指摘されているにも関わらず、予測する段階では無視されているのが現状である。そのため、風応答や風外力に対する風向変化の影響に関する研究は現在少しずつ始まっているが、いまだ不明な点が多い。

風向の非定常性とは、急激に大きく変化したり、主方向から変化した状態がある程度継続するような状態が続いたりすることが想定されるが、これに関する風のデータは蓄積されていない。なぜなら、耐風設計上問題となるような強風時に、現在適用されている予測対象時間の10分では大きな風向変化が発生しにくく、ほぼ同一方向に吹く状態になるということを仮定しているからである。また、たとえ一時的に発生した風向変化を無視しても、

現在のように応答や風外力が最も大きくなる風向での予測値に基づく耐風設計手法では、耐風設計上最も危険性が高い風向での風による挙動に対して問題がなければ、それ以外の風向や風向変化に伴う応答を包括する応答となる、安全上支障がないと考えられているためだと思われる。しかしながら、最近、設計法の発展に伴い、風向別の応答特性を取り入れて設計する場合が見られるようになってきている⁹⁾。実現象のように風向が非定常性を有している場合、風向が変化しているわずかな時間でも、その継続時間次第では応答が発散したり、変化した風向での応答値に達して、10分間平均風向での予測応答値を上回ったりする危険性を否定出来ない¹⁰⁾。また、逆に風向の非定常性により応答が安定せずに応答予測値よりも小さくなることも考えられ、どのように影響するのか不明な点が多い。このため、積極的に風向別の応答特性を活用しようとした場合、風向の非定常性による影響を考慮する必要が生じてきていると考えられる。

ところで、建築物の強風被災の大部分は、外装材、付属物等、軽微な建築物に関わるものである。特に、外装材に関わる問題は、この100年に限ってみても、台風のたびに同じようなトラブルが生じている¹¹⁾。また、飛散物が屋根に当たると、屋根の瓦が飛ばされ、それがほかの住居に当たり、外壁や窓に損傷を与える可能性がある。つまり、外装材の被害は、連鎖して全体被害に繋がる可能性が高いという点で深刻である(図1.3)。当然、被害の軽減には建物外装材の耐風安全性を高めることが重要であることは言うまでもない。その建物外装材の風荷重算定の際に重要となるピーク風圧においては、実測値が風洞実験値を上回る事例が報告されている¹²⁾。その原因ははっきりとは不明であるが、瞬間的な風向変化に伴う非定常風圧の発生が一因すると考えられる⁷⁾。前述したように、現行の耐風設計では、瞬間的な風向変化による非定常風圧の影響は考慮されていないが、多発する建物外装材の被害を鑑み、非定常風圧の影響を検討することは建物外装材の耐風安全性を高めるためにも重要であることは明らかである。

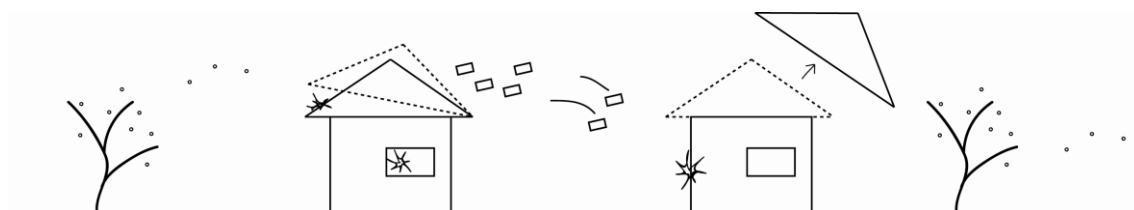


図 1.3 被害の相関と連鎖

1. 2 耐風設計の研究の変遷

本研究は、耐風設計に関わるため、耐風設計の研究の変遷を振り返りたいと思う。また、耐風設計の発展に大きな役割を果たした風洞実験の歴史も併せて以下に示す。

1877年、スコットランドのテイの入江を跨ぐテイ橋が、完成からわずか1年後に崩壊事故を起こした¹³⁾(図1.4)。この橋はスパン60mの錬鉄製トラスを84も重ねた、当時としては最大規模の構造物であったが、暴風により13径間の主構が列車とともに墜落した。この失敗により、構造物に対する風荷重の重要性が認識された。その後、1883年のBenjamin Bakerらによるエディンバラのフォース橋の設計では、慎重な検討がなされた。

一方、風洞はイギリスでFrank H. Wenhamによって1871年に初めて製作され¹⁴⁾、1900年代初頭の10数年間には多くの国で作られるようになった。当時の風洞実験は主に航空機用のものであった。記録に残る最初の建築の風洞実験は1890年代にオーストラリアのKernotとデンマークのIrmingerによって別々に行われている¹⁵⁾。Kernotはガスタービンの付いた風洞を使い、ばね天秤で風力を測定した。一方、Irmingerは、ガス会社の煙突に穴を開けて筒体を差し込み、煙突のドラフトで空気を吸い込ませるといった風洞を作り、平板・角柱・建物模型等の風圧分布を測定した結果、負圧の存在を明らかにした。

1889年にはエッフェル塔が竣工した。Gustave Eiffelはエッフェル塔の近くに風力研究所を作り、エッフェル塔の原型(全長3m)を作り、風洞実験に基づいた研究を行った人である¹⁶⁾(図1.5)。

日本における耐風設計は、1891年に曾禰達蔵が日本建築学会の「建築雑誌」にエッフェル塔の設計風力を紹介したことに始まる¹⁷⁾。実際に耐風設計の研究が行われるようになったのは、1934年9月21日、911hPaという世界的にもかつてない低い気圧を記録して上陸した「室戸台風」による²⁾(図1.6)。この台風被害については、多くの研究者や行政担当者によって徹底的に調査が行われた。一方、欧米でしだいに活発になってきた建築物についての風洞実験的研究が、武藤清博士らによって、昭和10年の「建築雑誌」に公表された¹⁸⁾。この時を境に設計用風圧力について、速度圧・風力係数の概念が導入された。しかし、風



図 1.4 テイ橋の落橋



図 1.5 Eiffel



図 1.6 室戸台風での被害

洞実験手法については一定風速の風を建築物模型に作用させていただけで、実際の風にある風速や風向の変動や高さ方向の風速変化を再現出来ていないために、実測を行ってみると実験結果と異なるという例が表れてきた。

1940年11月7日、シアトル郊外のタコマ海峡に架けられた当時世界第三位の吊橋タコマ橋が、開通わずか4ヵ月後に風速19m/sの風の中で1時間余り激しい振動を続けた後、落橋した¹⁹⁾。タコマ橋は、橋体の剛性が著しく低く、しかも断面形状も空気力学的に不安定なものであったために、後流の渦発生に原因する共振(渦励振)や自身の振動によって付加的に生じる空力不安定振動(自励振動)が激しく生じた。この事故を境に、風の静的作用だけでなく、動的作用にも関心がもたれるようになった。バフエッティングと呼ばれる空気力学的振動の評価法が構造物について研究されるようになったのは1961年のDavenportによるもので、それ以降の耐風設計において大きな役割を果たしている²⁰⁾。

風洞実験結果と実測結果の相違について合理的な説明がなされるようになったのは、1958年、デンマークのJensenによる論文からである²¹⁾。その結果、風洞床面にラフネスブロックと呼ばれる適当なブロックを敷き、当該地の風に相当すると判断される風を再現するようになった。

一方、日本では、1963年に建築基準法が改正され、それまでの31mという高さ制限が撤廃され、5年後には国内初の超高層ビルである霞が関ビルが完成している。

Davenportは、風速の時間的・空間的変動、すなわち風の乱れが建築物に与える荷重効果を確率統計的手法によって評価し、それと等価な効果を与える風荷重を定めるという手法を耐風設計に導入した。これらの実験の成果は、1970年代のカナダ規定の改定時に、風の乱れの動的効果を取り入れた風荷重として全面的に盛り込まれた。また、1981年には「建築物荷重指針」の風荷重の項が全面改訂され、この考え方である確率統計的手法が採用された²²⁾。

1991年には台風19号が到来し、日本では最高額の保険金支払額である5679億円を記録するほどの大きな被害を残した(図1.7)。その後、「建築物荷重指針」は1993年に再び改正された。建築物の安全性だけでなく使用性をも考えるようになったこと、そして限界状態設計法への適用を可能なものとするために、風や風荷重のばらつきについての情報整理が行われた点が重要である。また、この年には日本一の高さを誇る横浜ランドマークタワーが完成した。そして、2004年、旧指針から10年以上が経過したことや近年の性能設計への対応のために限界状態設計法を利用することを前提に、データ整理を中心に見直しを行い、改訂が行われた²³⁾。ここでは、建築物に要求される性能として、安全性・使用性に加え、修復性が付け加えられた。

現在、これらを定量的に把握するために、実測や数値解析との対応を考慮した様々な風洞実験が行われている。また、コンピュータの劇的な発展に伴い、風洞実験とは別に、



図 1.7 台風 19 号の被害

風の流れを数値解として捉え、目に見えない風の渦や風圧力を直接シミュレーションする研究や可視化をする研究もなされている。しかし、耐風設計がますます進化していく一方で、2005年、アメリカにてハリケーン・カトリーナが発生し²⁴⁾、記憶に残る災害の中で最も大きな被害を齎したのは述べるまでもない(図 1.8)。



図 1.8 カトリーナの被害

前述したように、台風やハリケーンで被害が大きくなる理由として、風向が非定常性を有している場合に、わずかな風向の変化時間でも、その継続時間によっては応答が発散したり、変化した風向での応答値に達したりして、10分間平均風向での予測応答値を上回る危険性があるということが分かっている。例えば、「正方形平面の風応答・風向特性に対する風向の非定常性の影響」⁷⁾によると、1998年9月16日の台風時の2時から10分間の自然風での風向、風速を計測しており、主流方向風速の低下は実験では再現されておらず、自然風での乱れ強さが実験時と比べ大きいことの一要因であることを指摘している。また、風向の変動では、主流方向風速が低下する時刻で比較的大きな風向変動が生じている場合が多く、その風向変動の幅は45度以上に達していると述べている。こうした急激で大きな風向変動とは別に、数10秒ではあるが、10分間平均風向とは異なる風向に変化したまま維持されているような、風向が変化して継続する状態も確認されている。さらに、この風向変動が建物の応答に影響することも確認されている。

このような風向変動をはじめとし、はっきりと解決出来ない事象はいまだ数多く残っている。多くの事象に対応出来るよう、近年では様々な風洞が開発されている。次節では、現在どのような風洞が存在するかをまとめ、特に風向変動に着目して既往研究を挙げた上で、本研究で扱うアクティブ型風洞の位置付けを整理する。

1. 3 種々の風洞と複数ファン風洞の位置付け

風洞とは辞書によると「人工的に風を発生させるためのトンネル状の研究装置」と説明されている。この説明の通り、基本的に風洞には空気流を発生させるための送風機と流れを内部に流すトンネル状の空間があれば良い。

風洞には、流れを風洞端で開放する開放型風洞(Eiffel 型風洞)とループ状の風路で回流させる回流型風洞(Guttingen 型風洞)の 2 種類がある。開放型風洞には、風上側に送風機がある押し込み型と吸い込み型の 2 種類がある。

まず、生成する風の流れの違いにより分類した 3 種類の風洞を紹介する。

1. 低乱風洞

航空機や自動車など、対象物の速度が流体速度よりも極めて大きな場合には、風洞内に乱れの少ない気流を生成する必要がある。乱れ強さ 0.05%以下を達成している風洞もある。

2. 境界層風洞

地上に固定された構造物などに作用する流体問題を検討するには、実際に生じる接地境界層を再現する必要がある。地表付近の接地境界層は、地形の起伏・粗度条件により影響を受け、これを忠実に再現することは困難ではあるが、図 1.9 に示したように、風洞の床面にスパイヤやラフネスブロックを設置して、短い風路で安定して発達した境界層を発生させる工夫が施されている。また、一般的に、平均流速と乱れ強さに関する高さ方向の分布形状を再現することが多く、流れ方向に十分発達した乱流特性を得るには、風路高さの 6 倍程度の風路長さが必要である。



図 1.9 境界層風洞
(飛鳥建設 HP より)

3. 温度成層風洞

大気環境を対象とした風洞実験においては、時として低風速における大気安定度を再現する必要がある。この場合には、風洞においても温度勾配を再現し、熱浮力を加味した実験を行う。

次に、生成したい風の目的の違いにより分類した 3 種類の風洞を紹介する。

1. 可視化風洞^{4) 25)}

建物周りの複雑な流れを解明するために、本来見ることの出来ない空気の流れを可視化する様々な工夫がされている。模型の風上で煙や微粉末などを気流内に発生させ、レーザーライトシートを照射することにより、任意の断面での流れが観測出来る。また流れの様子を撮影した画面をデジタル処理し、風速や風向を求める画像解析法も利用出来る。また、一般の風洞でも目的に応じて種々の方法を用いて流れの可視化が可能である。

(a) 壁面トレース法

物体表面近傍の流れ，流体機械の内部壁面近傍の流れを観察するために用いられる。油膜法，油点法が代表例である。

(b) タフト法

古くから流体実験に用いられた手法である。タフトは最も簡単な風向計で，これを使用する可視化をタフト法と称する。

(c) トレーサー法

流れに目印となる物質を混入し，その動きを観察するもので，速度場，渦度場も可視化することが出来る。

2. 特殊風洞²⁶⁾

気象・建築・交通と多岐に亘る分野で必要不可欠となっている風洞には，現在いくつも特殊な目的のために作られた風洞が存在する。そのうちのいくつかを紹介する。

(a) 風波水槽

長い流路の水槽に水をはり，その水面上に気流を送風する。水表面における波の発生の様子，吹送距離と波の高さの関係，変形する自由表面上の境界層流の性質及び相互作用などを調べるために用いられる。

(b) 低温変圧風洞

高レイノルズ数の実験を可能にするために製作された風洞である。

(c) 水風洞

高所に設置された大型ヘッドタンクに汲み上げられた水を重力落下で鉛直の水路中に流す方式である。落下式のため主流に含まれる乱れが小さい。

(d) 火災風洞

有風下での火災実験を行うために用いられる。建築部材としての木材の燃焼速度や建物火災の火災性状，延焼メカニズムなどの実験に用いられる。

(e) 雪氷防災低温風洞

回流型密閉方式の風洞全体が-30度から-25度の温度制御された低温実験室内に収容されている。風洞内に雪を降らせたり，積雪させたりすることが可能で，吹雪現象のメカニズムや構造物への着雪氷の現象などの実験が可能である。

(f) 大型低騒音風洞

鉄道総合技術研究所風洞技術センターに設置されている。自由壁型測定部は約20m四方の無響室に収められており，その低騒音性を活かして種々の空力騒音実験が可能である。

(g) 超音速風洞

超音速流を発生させ，流体実験を行う風洞である。超音速で飛行する航空機やロケットなどの空力特性，空力加熱などを調べるために用いられる。

(h) 遷音速風洞

遷音速風洞とは、一般に気流マッハ数が 0.3 から 1.3 程度までの亜音速流から超音速有までの流れを発生させる風洞で、音速近くで飛行する航空機などの空力特性を調べるために使用される。

3. アクティブ型風洞⁴⁾

風工学での研究対象は、大気の流れで、通常は乱れた状態にある。平均風速・乱れの強さ・乱れのスケール・レイノルズ応力・スペクトル・プロファイル・コヒーレンスなどの諸特性を考慮して大気乱流を実験的に再現している。実際にはこれらの特性は、粗度によって大きく変化することが知られているので、その地点での地表面の状態を風洞内に再現することが重要になる。しかし、Davenport and Isyumov の報告によれば、長さの縮尺率 1 / 500 で、自然風と相似な気流を作成するには、長さ 24m 以上の測定洞が必要とされている²⁷⁾。

そのため、このような大規模な風洞を建設することが出来ない場合は、測定部上流に格子・スパイヤ・粗度要素などを配置し、気流を調節するパッシブな方法が従来取られてきた。しかし、境界層の十分な発達には風洞の規模による制約が大きい。所要の特性を得るには、多大な労力を要する場合も多い。

これらを克服するために、外部から強制的に流れを攪拌・制御し、効率的に主要の気流特性を達成しようというアクティブな方法が現在着目されている。本研究で扱う複数ファン風洞もアクティブ型風洞の 1 つである。既往の代表的な研究を例に、アクティブ制御法の様々な取り組みを以下に述べる。

(a) 二次元風洞実験を対象とした乱流のアクティブシミュレーション(1991)²⁸⁾

AC サーボモータにより動翼列と並列板を駆動させて、自然風と相似な二次元乱流を吹き出し型風洞にシミュレートすることを試みている。動翼列を同位相に回転駆動させることによって、気流に傾斜角を与えて、鉛直方向成分の気流変動を制御する。また、並列板の回転駆動により、風路の閉塞率を変化させて主流方向成分の流速を変化させている。これらで再現出来るのは、数 Hz までなので、高周波数成分の変動は格子やメッシュの種類を変化させることで補っている。得られたデータをフィードバックすることによって、目標とするパワースペクトルに十分近い乱流をシミュレートすることが出来た。また、主流方向の乱れの強さは約 20%で、乱れのスケールは 450cm の値を得ることが出来、格子乱流によるスケールより 1 桁大きいものが得られた。

(b) アクティブ制御三次元自然風シミュレーションに関する基礎的研究(1994)²⁹⁾

翼列・ダンパ・開閉式スパイヤ・昇降式ブロックの 4 通りのアクティブ型乱流発生装置を提案し、それらの効果について検討を行っている。縮尺 1 / 20~1 / 100 程度の大型模型に適用可能な大きな乱れの強さとスケールを有する三次元境界層乱流を発生させる目

的である。翼列は各翼を同方向にピッチングさせることで、主流方向の変動風速を発生させ、ダンパは翼列部の上下に設置し、並列板を使用する。この翼列・ダンパ併用方式では、大スケールの乱れにおいて空間相関を自由にコントロールすることが出来た。また、スパイヤはパルスモータで幅員を変化出来、ブロックも同様に最大高さ 300mm までの範囲で上下運動出来る仕組みである。このスパイヤ・ブロック方式では、高さ方向に速度勾配を持つ大スケールの三次元的な境界層流を発生させることが出来る可能性があることが分かった。このように流動脈生成にはダンパを開閉させる方式が一般的であり、多くの風洞に採用されている。

(c) 主流方向脈動中における Bluff Body の空力特性(1986)³⁰⁾

perforated plate と回転ブレードを下流端に設置し、単位時間あたりの流体の量を周期的にわずかに変動させることによって脈流を発生させている。風洞における脈流の流れ方向の変動速度の大きさは、風洞下流端と回転ブレードとの隙間によって調整している。脈流の周波数はブレードの回転周波数を調整することによって簡単にしかも敏感に変化させることが出来る。

(d) アクティブ制御乱流風洞の研究(1996)³¹⁾⁻³³⁾等

多数の送風機を持ち、これらの送風機にコンピュータを用いて独立に制御し、さらに流路中に振動翼を設置して、鉛直方向や主流方向の乱れを与える構造の風洞を製作した。これらの可動部を個々に独立に制御することで、多くの異なる乱れを発生させ、目的の流れを作り出すことを試みている。これまでに、境界層の主流方向と鉛直方向のそれぞれの平均風速、乱れ強さ、乱れスケール及びパワースペクトルなどの乱流統計パラメータを同時に再現させた結果、ほぼ満足出来る結果が得られている。

(e) マルチファン型風洞による大気境界層の模擬作成(2002)³⁴⁾

アクティブ型風洞の目的の 1 つであるプロファイル特性を含めた大気境界層乱流を再現することを目的としている。具体的には、横 9 列、縦 11 段の計 99 個の軸流型送風機を持つ、エッフェル型風洞を用いている。その結果、すべてのファンを同位相で運転することに加え、従来のバリアやラフネスという補助的な手段を加えることで、目標となる境界層を作成することに成功している。

以下の 3 つについては、本研究との関係が深いため、より詳しく説明する。

(f) 風向が時間変化する気流による非定常空気力の測定(2002)³⁵⁾

AC サーボモータでファンの回転数を制御する送風機を放射状に配置した風洞によって、風速とともに風向も変動する気流を生成しようと試みている。用いた送風機は図 1.10 に示すように吹き出し口が径 10cm の円形断面の小型なものであるが、最高風速 13m/s、0.1 秒で 10m/s の風速差を達成する能力を有している。

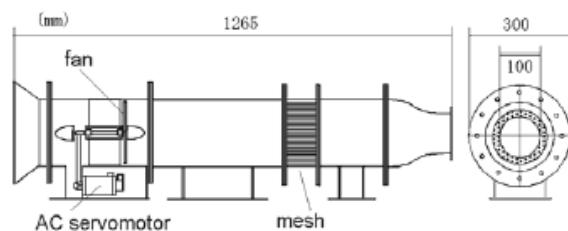


図 1.10 送風機

AC サーボモータ送風機 2 本を水平面内に斜交配置し、2 方向の気流を合成させる。2 本の送風機の狭角は 45 度とした。予備的な実験によれば、2 本の送風機から同じ風速の定風速気流を発生させて合成すると、合成気流の方向は中心軸方向となる。このとき合成気流の乱れ強さは単独気流の倍程度（およそ 1%か 2%程度）になるが、脈流のような不整な変動は発生しないことが確認された。これから、2 本の送風機の中心軸方向風速成分と中心軸直交方向成分がともにカルマンスペクトルに従う合成気流を作成した。図 1.11 は合成気流の変動スペクトルの例であり、目標のスペクトル分布に従った気流変動を得ることが出来ている。

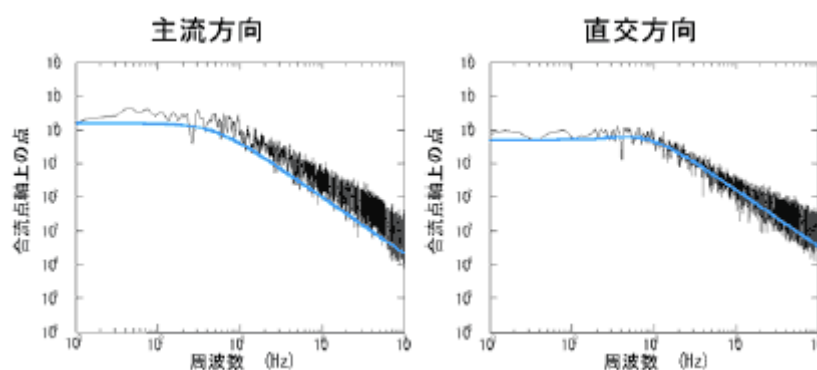


図 1.11 合流点の気流変動 (平均風速 4m/s, 乱れ強さ 0.1, 乱れスケール 10m)

AC サーボモータ送風機が急激な風速変動の気流を生成出来ることを利用して、例えば、風速振幅が大きい脈動気流による空気力の非定常特性を検討する実験を行っている。海洋工学の分野では周期的に流れを反転させ、変動流速の中央値がゼロという条件で多くの研究がなされており、これに対し、この研究では非ゼロの平均風速を持つ脈動流を生成し、正方形角柱に作用する空気力を測定している。

また、送風機を挟角 45 度で 3 本配置し、2 本ずつの気流を合成させることにより±45 度の範囲で風向を時間変化させることが出来る装置を作成した。この装置を用いて正方形角柱に作用する空気力に対する風向の時間変化率の影響を測定した。

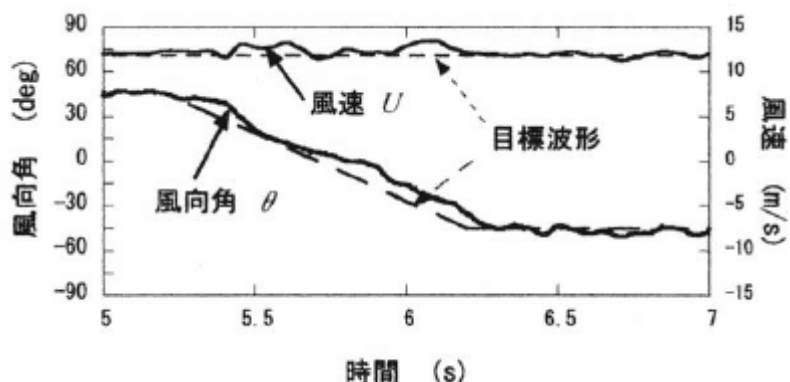


図 1.12 作成した気流の風速と風向

図 1.12 は実験に用いた合成気流の 1 つであり、風速がほぼ一定(12m/s)で、1 秒間で-45 度から+45 度までの 90 度の風向が変化する。他に 1 秒間に 5 度、180 度風向が変化する気流を用いた。

図 1.13 に、それらの気流によって正方形角柱に作用する空気力 F_x の無次元係数 C_{FX} の変化を定常風向の気流による値と比較して示す。また図 1.14 は空気力係数 C_{FY} の変化である。いずれも、風向変化率が大きくなるほど定常風向による空気力の値との差が大きくなる傾向にある。

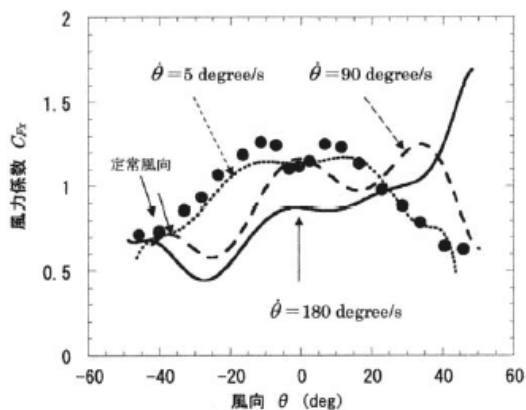


図 1.13 定常風向気流と風向変動気流の風力係数 C_{FX} の比較

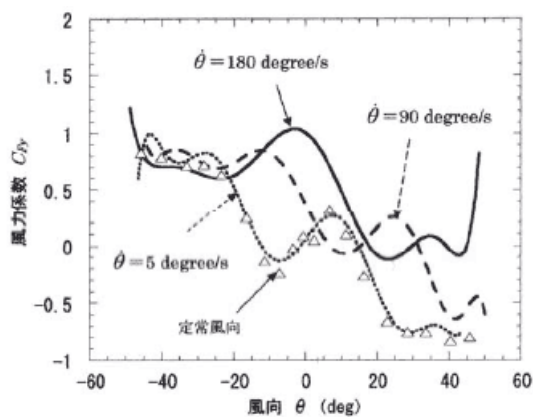


図 1.14 定常風向気流と風向変動気流の空気力係数 C_{FY} の比較

(g) 圧力勾配方向の制御による風向変動風洞の試作(2005)³⁶⁾

この研究では、自然風が持つ風向特性を再現することが出来るように風向変動風洞が試作されている。これは、中央に円盤状の測定部を置き、それを囲むように放射状に配置された8個の流出風路と8個の流入風路により構成される(図 1.15)。流出風路及び流入風路は、個別に開閉可能なシャッターを介して、1つのシロッコファンの吹き出し及び吸い込み口に接続されており、基本的には対角線上のシャッターの組を開放することによって、その風向の風を生じさせるものである。地表面の高圧部と低圧部の位置の変動により風向変動が生じる、自然風のメカニズムと同様の風向変動メカニズムを用いている。なお1つの風路の吹き出し口の寸法は、幅 195.1mm、高さ 150mm である。

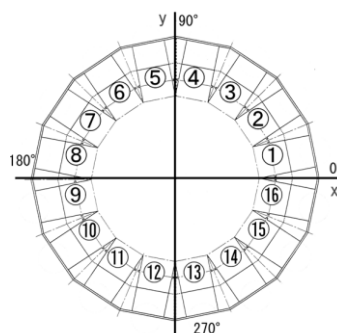


図 1.15 平面図

実験は、対角線上のシャッターを1つずつ開けて風向変動を生じさせるすべての組み合わせについて行っている。例えば、①,⑨のシャッターを開いた状態から③,⑪のシャッターを開いた状態にすばやく変えた時の風向と風速の時系列が図 1.16、図 1.17 である。シャッターを開閉して風向変動を起こした瞬間、風速が低くなっている様子が確認出来る。他のケースでは、風速が高くなることもあり、風向変化に伴って生じる風速変動の傾向は安定していない。これはシャッターの開閉を手動で行っていたことが、原因であると考えられている。また、ファンの回転数を一定にしても風速が緩やかに増加するケースがあり、風洞内の気流が安定しない原因を解明・解決していく必要がある。

このあとに発表された「風向変動風洞の風向変化性能の検討(2007)」³⁷⁾では、シャッターの開閉をコンピュータ制御にしている。シャッターの開閉により風向を変化させた際の風速と風向を、スプリットフィルムプローブを用いて同時測定した。測定ケースは④-⑫の風路から⑥-⑭の風路への単風路の風向変化と④⑤-⑬⑭の二つずつの風路を開けた状態から⑤⑥-⑬⑭を開けた状態への2風路の風向変化について、シャッター開閉タイミングをパラメータとした。単風路では平均風速 3.4m/s で 42.9 度の風向変化が、2風路では平均風速 2.0m/s で 21.7 度の風向変化が生じた。風向変化前後の2秒間の風速の無次元標準偏差(標準偏差を平均で除したもの)と2方向のシャッター同時開放時間の関係が図 1.18 である。無次元標準偏差が

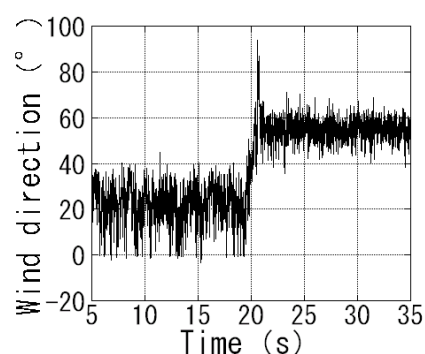


図 1.16 風向変化 (1&9→3&11)

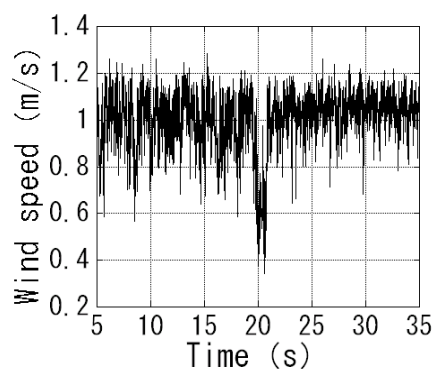


図 1.17 風速変化 (1&9→3&11)

最も小さくなるのは、2方向のシャッターが開放される時間が単風路で0.0s、2風路で0.1sで、2風路は単風路に比べて風向変化時の風速変動が小さい。

次に、どの程度の時間間隔で風向変化を生じさせることが可能なのか検討することを目的とし、単風路、2風路に対して、先ほど無次元標準偏差が最も小さかった2種類を用いて、シャッター開閉タイミングを0.5s、1.0s、2.0s、3.0s、4.0s、5.0s、10s、20sの場合について風向を往復変化させた。図1.19に無次元標準偏差と風向変化間隔の関係を示す。無次元標準偏差は、単風路において5秒以下になると増加しているのに対し、2風路ではほぼ一定の値である。また、2風路の場合は、風向変化間隔を小さくしても、風向を往復させた場合に風速の大きな変動は生じていない。

図1.20は、2風路において風向変化の間隔0.5sで往復させた場合の風向時刻歴を示す。100度付近から130度程度まで風向が変動し、その後100度へと風向が往復していることが確認出来る。このように、短時間に往復の風向変化をさせた場合は、装置が定常的に生成する風向変化よりも大きな風向変化が生じるオーバーシュートが目立つ結果になっていることが分かる。

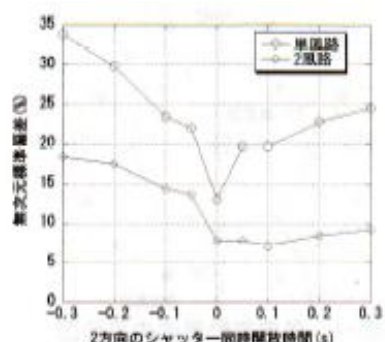


図 1.18 無次元標準偏差とシャッター一同時開放時間の関係

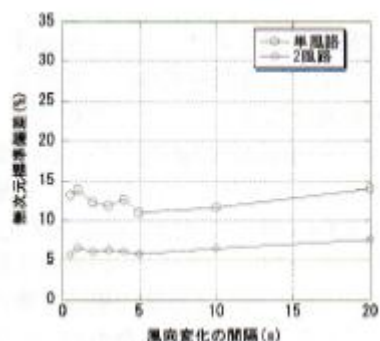


図 1.19 無次元標準偏差と風向変化間隔の関係

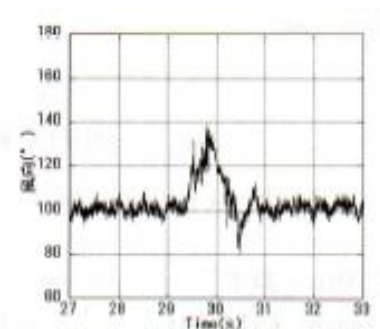


図 1.20 往復の風向変化の風向時刻歴

(h) 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)³⁸⁾

喜々津仁密によるこの研究は本研究で扱う複数ファンを備えたアクティブ型風洞を用いた唯一の研究である。

従来の粗度要素を用いた風洞実験では、縮尺の設定の上で限界があるので、風洞内で大きな乱れをもつ気流の模擬が必要であること、1970年代以降の耐風設計法が確率統計論の背景に基づいている現状などを考慮すると、実験目的によっては、模擬気流の制御目的値として、べき指数 α よりも、パワースペクトルやココヒーレンスといった統計値を用いた気流模擬の手法が必要だと思われる。

目的は、複数ファンの回転数制御によって、主流方向に関して比較的low周波成分の大きな乱れを有する気流を作成し、比較的容易に要求する乱流特性を模擬出来る手法の提案である。周波数領域におけるファンの特性に関しては、変動の高周波数成分の入力パワーが測定結果に再現されにくい。したがって、模擬気流のパワースペクトルのピーク位置が高周波数側に偏る設定の際には、このファンの特性の限界を考慮する必要がある。また、従来の境界層乱流風洞では比較的low周波数成分のパワースペクトル特性と空間相関を自在に制御するのは、一般にかなり困難である。そこで、比較的low周波数成分のパワースペクトル特性と空間相関の提案をする。目標とするパワースペクトルを設定して、そのスペクトル形状に対応する風速変動を有する気流の作成を行った。ここで用いた気流制御の方法は、ココヒーレンスの測定値と目標値との差を考慮するものである。周波数と2点間距離の増加にともなって相関が減衰する性状をもつ気流が模

擬出来、収束時には平均2乗根誤差が15%未満になっている。また、その際のパワースペクトルに関して、中心高さ付近では、目標値に近い値(平均2乗根誤差が20%未満)が得られたが、上下壁面付近では境界層の影響による誤差がみられ、外乱としての境界層を考慮したパワースペクトル制御を、さらに考える必要がある。

以上、アクティブ型風洞について既往研究を例に挙げ、説明した。本風洞はこのアクティブ型風洞の1つであり、6つのファンを備えている。今後、より着目されていくであろうアクティブ型風洞の可能性を探るため、本研究では風向変動に着目する。

1. 4 研究の視点と目的

前述したように、自然の風では常に非定常的な変化が起こっており、現実の評価時間である 10 分間平均には現れないような風向変動が実際に建物に影響を及ぼすことが既往の研究でも指摘されている。しかし、従来の境界層型風洞では、1つのファンから吹かせた気流に、粗度要素を用いて乱流を発生させていたため、気流そのものに変動を与えることが困難であり、風向変動を作り出すことは難しい。そこで近年、風洞の非定常性に着目した風向変動用の風洞が開発され、実験がなされている段階である。しかし、現段階では確立した手法は存在しておらず、複数ファン風洞による風向変動の実験は前例がない。

そこで、本研究では、数 10 秒間程度の数 10 度風向変化が建物に及ぼす影響を探ることを念頭に置き、複数ファン風洞において可能となる風向変動がどのようなものであるかを探る。

本風洞での類似した研究は存在しないため、本研究での目的は、アクティブ型風洞である 1 列 6 段のファンを組み込んだ風洞を用い、ファンを数値制御することで、従来の境界層型風洞では不可能であった数秒から数 10 秒程度の風向変動を持つ気流を作成することとする。

また、建物外装材の風荷重算定の際に重要となるピーク風圧については、実測値が風洞実験値を上回る事例が報告されており、その原因ははっきりとは不明であるが、瞬間的な風向変化に伴う非定常風圧の発生が一因するのではないかということが言われている。そのため、作成した非定常な風向変動が建物にどのような影響を及ぼすかを風圧の面から捉える。そして、これまで可能であった一様流の建築物に対する風圧との比較を行うことでこのような実験の有用性を検討する。

1. 5 論文の構成

1 章では、耐風設計の研究の歴史と風洞の現状を述べた上で、本研究で扱う複数ファン風洞の位置付けを行った。そして、風向変化を持つ気流の作成を行う意義を述べた。

2 章では、本研究で用いた風洞の概要を述べ、風洞内の気流性状について説明する。

3 章では、本風洞での風向及び風速変動の様子を予想するために、可視化実験を行い、その傾向を把握する。

4 章では、3 章をもとに、様々なケースにおいて本風洞でどのような風向変化が起こるかを x 型熱線風速計を用いて測定する。

5 章では、4 章で作成した風向変動を持つ気流と従来の風洞で作成可能な一様流とを、建築物への影響について風圧測定により比較し、この種の実験の意義を考える。

6 章では、本研究の結論を述べる。

参考文献

- 1) 20世紀の予言, 報知新聞 1901年1月2日, 3日号, 1901
- 2) デジタル台風
<http://www.digital-typhoon.org/>
- 3) 社団法人 日本損害保険協会
http://www.sonpo.or.jp/news/release/2006/0610_04.html
- 4) 日本風工学会編, 風工学ハンドブック, 日本風工学会, 2007
- 5) 大熊武司・神田順・田村幸雄, 建築物の耐風設計, 1996
- 6) 丸川比左夫・大熊武司, 高層建築物の風応答予測のための風直角方向および捩れの風力モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集 482号, 1996
- 7) 鈴木雅靖・田村哲郎・眞田早敏・山本学, 正方形平面建物の風応答・風圧特性に対する非定常性の影響, 2001
- 8) 谷池義人・谷口哲郎・武平俊秀, 自然風中における立方体建物に作用する風圧特性, 第16回風工学シンポジウム, 2000
- 9) 建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説, 日本建築学会, 1991
- 10) 鈴木雅靖・田村哲郎, 正方形角柱の空力振動特性の風向依存性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 518号, 1999
- 11) (社)日本鋼構造協会編, 構造物の耐風工学, 東京電機大学出版局, 1997
- 12) 池内淳子・谷口徹朗・谷池義人, 瞬間的な風向変化により外装材に作用する風圧力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002
- 13) 川田忠樹, ボーモンの卵, 建設図書, 1987
- 14) <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/SP-440/ch1-3.htm>
- 15) http://www.saed.kent.edu/~amsharag/Chapter_1.pdf
- 16) 松浦寿輝, エッフェル塔試論, 筑摩書房, 1995
- 17) 藤本盛久, 自然と建築構造, 構造工学研究, 東大出版会, 1968
- 18) 武藤清・中井新一郎・坪井善勝・仲威雄, 構造物に及ぼす風の作用に関する各国の実験的研究, 建築雑誌, 第595号, 1935
- 19) 川田忠樹, だれがタコマを墜としたか, 建設図書, 1975
- 20) Davenport,A.G., The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structure, Proc. of Instn. of Civil Engrs, Vol.19, 1961
- 21) Jensen,M., The model-law for Phenomena in Natural Wind., Ingenioren,Intl,Editn, Vol.2, 1958
- 22) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 1981
- 23) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 2004
- 24) http://news.nationalgeographic.com/news/2005/08/photogalleries/hurricane_katrina/

- 25) 鹿島建設 HP より
<http://www.kajima.co.jp/tech/katri/facility/>
- 26) 最新の風洞実験法に関する比較研究, 京都大学防災研究所, 2001
- 27) Davenport,A.G. and N.Isyumov, The Application of the Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading, Proc. Res. Sem. on Wind Effects on Buildings and Structure
- 28) 小林紘士・畑中章秀, 二次元風洞実験を対象とした乱流のアクティブシミュレーション, 1991
- 29) 藤本信弘他, アクティブ制御三次元自然風シミュレーションに関する基礎的研究, 1994
- 30) 松本勝・白石成人・白土博通, 主流方向脈動中における Bluff Body の空力特性, 第 9 回風工学シンポジウム論文集, 1986
- 31) 西亮・松田雄二他, アクティブ制御乱流風洞の研究, (その 1) 流れ方向と鉛直方向の乱れ同時制御, 第 14 回 風工学シンポジウム論文集, 1996
- 32) 西亮・松田雄二他, アクティブ制御乱流風洞の研究, (その 2) 時間遅れ修正法による乱れ制御, 第 14 回 風工学シンポジウム論文集, 1996
- 33) 西亮・松田雄二他, アクティブ制御大気乱流風洞のスペクトル特性, 第 15 回 風工学シンポジウム論文集, 1998
- 34) 永友誠・小園茂平・加藤英明, マルチファン型風洞による大気境界層の模擬作成, 第 17 回風工学シンポジウム論文集, 2002
- 35) 野村卓史・北側徹哉・鈴木洋司・赤松弘一郎, 風向が時間変化する気流による非定常空気力の測定, 第 17 回風工学シンポジウム論文集, 2002
- 36) 木村吉郎, 徳永拓也, 久保喜延, 加藤九州男, 圧力勾配方向の制御による風向変動の試作, 日本風工学会年次研究発表会・梗概集, Vol. 2005 (2005), 2005
- 37) 瀧山泰士・森暁一・木村吉朗・久保喜延・加藤九州男, 風向変動風洞の風向変化性能の検討, 日本風工学会誌, 第 32 巻第 2 号, 2007
- 38) 喜々津仁密, 複数ファンを用いた乱流風洞における模擬気流の作成, 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻, 修士論文, 1996

■ 2. 風洞の概要と気流性状

2. 1 風洞設備

実験は、東京大学新領域創成科学研究科の風洞実験室にある風洞にて行った。風洞の図面を図 2.1 に示す。測定洞は高さ 600mm×幅 200mm×長さ 3600mm で、吹き出し式風洞である。上流端に縦列された 6 個のファンから測定洞への流路は 5 / 9 の断面比で縮流され、気流のねじれを防ぐストロー状の整流格子を挿入してある。トラヴァースは上流端から 1100mm, 2200mm, 3300mm に設置することが出来、それぞれプローブサポートを取り付けることが出来る。本研究ではファンによる影響を探るため、最もファンに近い 1100mm の位置にトラヴァースを設置した。プローブサポートは、トラヴァースの位置から風洞測定洞の上流の方向に 300mm の範囲で自由に動かすことが可能である。例えば、1100mm のトラヴァースの位置では 800mm から 1100mm までの範囲で測定が可能である。また、気流の可視化実験のために、縮流洞及び測定洞の片面にはアクリル板が用いられている。

本研究では、測定洞上流端の床面を原点として主流方向を x 、鉛直方向を z と呼ぶことにする。 x の範囲は 0mm から 3600mm で、 z の範囲は 0mm から 600mm である。また、各ファンを下から順に、ch1, ch2, ..., ch6 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。AC サーボモータは YASKAWA サーボモータ SGM01B312 を、小型ファンは EBARA 大静圧 2 段羽タイプ MSW18BTA を採用した。AC サーボモータは、応答性が良く、速度制御範囲が比較的広いという特長を持つ。また、回転範囲数は 0rpm から 3000rpm であり、それぞれのファンを独立に制御出来る。図 2.2 に風洞の写真を示す。また、本研究においては説明のために、ch1, ch2 を下部のファン、ch3, ch4 を中心部のファン、ch5, ch6 を上部のファンとして定義するものとする。

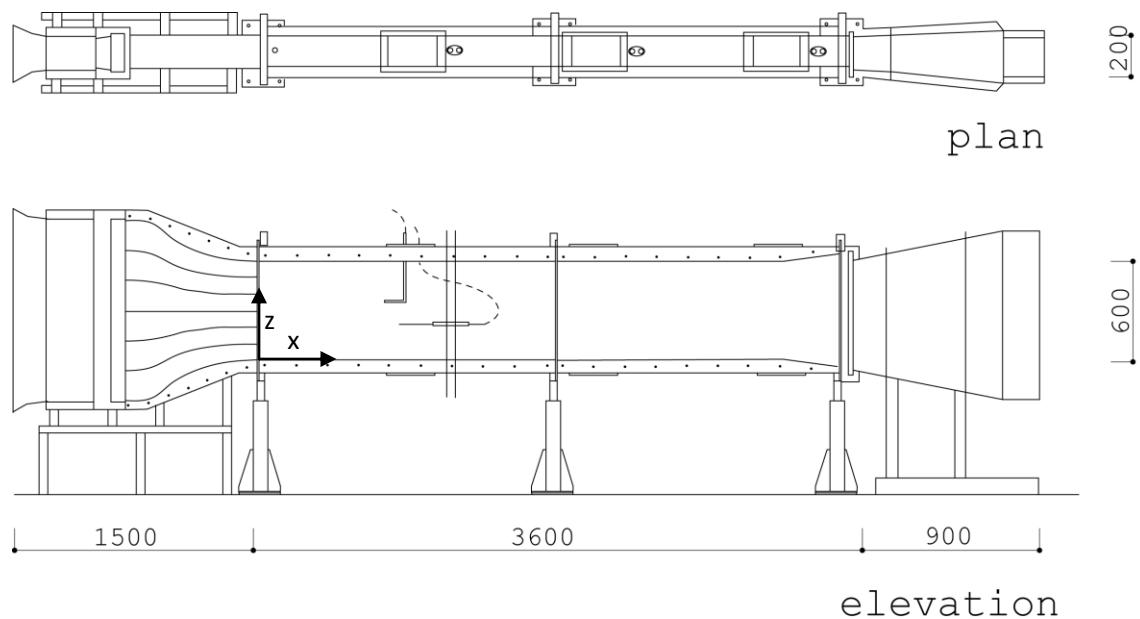


図 2.1 風洞図面

表 2.1 風洞諸性能

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

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



図 2.2 風洞写真

2. 2 入力電圧と気流の関係

実際に各ファンを制御する際には、0v から 5v までの電圧値を入力する。入力電圧と回転数は比例関係にあり、0v が回転数 0rpm、5v が回転数 3000rpm に対応する。ここでは、入力電圧と測定される風速の関係を求める。各ファンに 0v から 5v の値を 0.5v 刻みで入力し、x=1000mm、z=300mm での風速を、ピトー管を用いて測定した。測定結果を図 2.3 に示す。

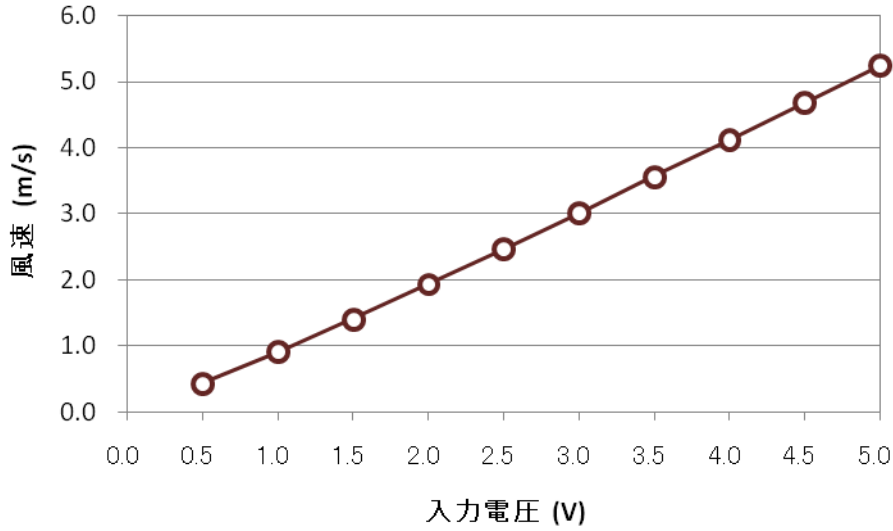


図 2.3 x=1000mm、z=300mm での入力電圧と風速の関係

0v から 0.5v の間では値が小さいため、測定値が乱れていたものの、0.5v より大きな入力電圧は、風速との明確な比例関係が確認され、1次近似により (2.1) 式が得られる。

$$V = 1.08 \times V_{It} - 0.18 \quad (2.1)$$

この結果を用いて、x型熱線風速計のキャリブレーションを測定時に行う。ここでは代表例としての入力電圧と気流性状の関係を示す。図 2.4 は x=1000mm での 6 個すべてのファンの入力を 1v、2v、3v、4v とした場合(一様流)の平均風速の鉛直分布である。また、図 2.5 はそれぞれを入力電圧で割り、基準化したものである。

これらから、概ね z=150mm から z=450mm において風速の一様性が成り立っていることが確認された。入力電圧と測定値との関係は熱線風速計ごとに誤差があるが、入力電圧 2v、3v、4v においては、測定値に明確な比例関係がみられた。しかし、1v においては、他の入力電圧での基準化した風速に比べ、少し小さい値を出していることが分かった。

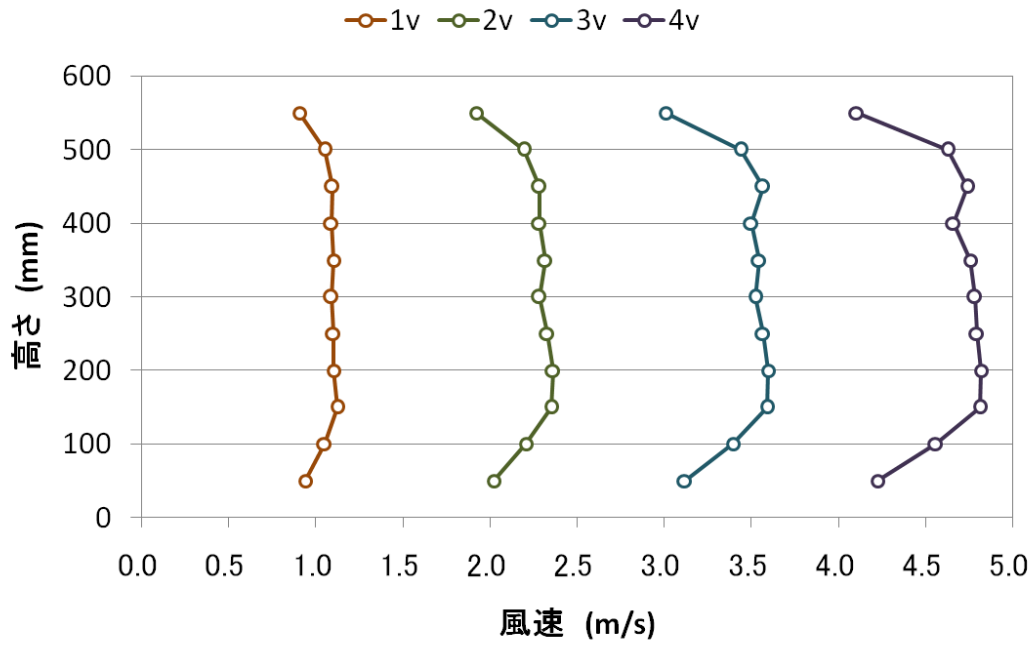


図 2.4 入力電圧の違いによる平均風速鉛直分布(x=1000mm)

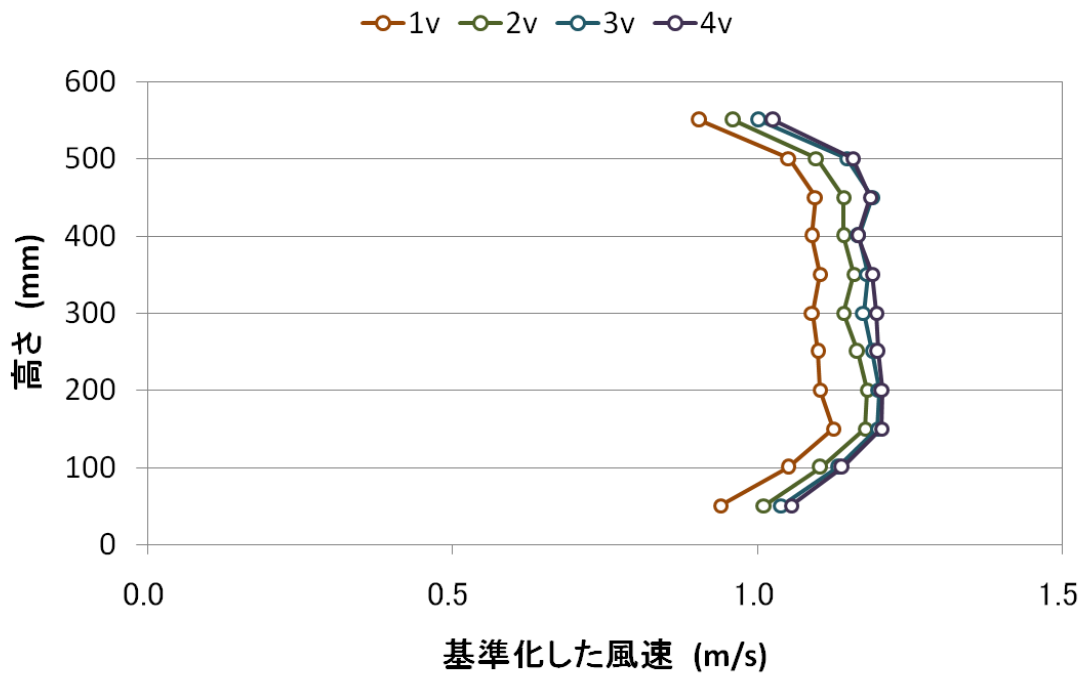


図 2.5 入力電圧で基準化した平均風速鉛直分布(x=1000mm)

次に、図 2.6 に入力電圧の違いによる乱れの強さを示す。(2.2)式に示すように、乱れの強さ I_u とは、変動成分の標準偏差 σ_u を平均風速 \bar{U} で除したものとして表現される。

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \quad (2.2)$$

「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)¹⁾における喜々津の実験データを点線で示した。これは、 $x=2000\text{mm}$ での入力電圧 3.3v における乱れの強さであるが、本研究でのデータとほぼ一致しており、妥当性が示されている。

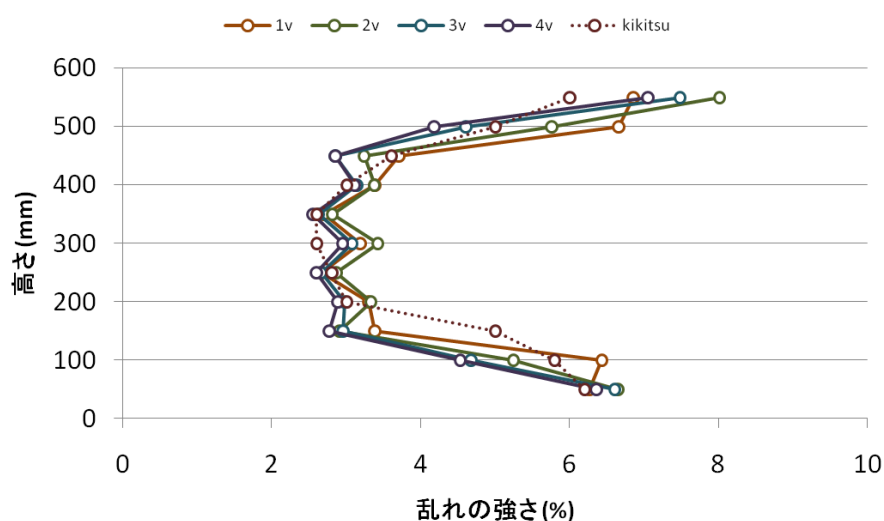


図 2.6 入力電圧の違いによる乱れの強さ

本風洞では、風速約 5m/s までの再現が可能であるので、現実の 50m/s までの風を想定することを考えると、風速の縮尺率は 1/10 が妥当であると考えた。ファンの停止時間が性能上最低 2 秒必要であることを踏まえ、模型の縮尺率を 1/100 と想定すると、時間の縮尺率は 1/10 に相当する。

このように、本実験では(2.3)式、(2.4)式、(2.5)式に示す縮尺を想定した。

$$\text{模型の縮尺率: } \lambda_L = L_{\text{model}} / L_{\text{field}} = 1/100 \quad (2.3)$$

$$\text{風速の縮尺率: } \lambda_u = V_{\text{model}} / V_{\text{field}} = 1/10 \quad (2.4)$$

$$\text{時間の縮尺率: } \lambda_T = T_{\text{model}} / T_{\text{field}} = 1/10 \quad (2.5)$$

2. 3 様々な条件設定と風洞特性

2. 3. 1 任意の回転数と平均風速分布との関係

「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)¹⁾における喜々津の実験によると、任意の回転数と平均風速の関係が線形的な関係で得られることが示されている。

具体的には、5個のファンの回転数を固定し、残り1個のファンの回転数をパラメトリックに変化させた平均風速 V_p を測定している(以下、前者を基準回転数 R_0 、後者を変化回転数 R_p とする)。 $R_0=1000\text{rpm}$, 2000rpm , 3000rpm の3通り、 $R_p=0\text{rpm}$, 500rpm , 1000rpm , 1500rpm , 2000rpm , 2500rpm , 3000rpm の7通りである。また、測定位置は、 $x=3100\text{mm}$ で、 $z=150, 225, 300, 375, 450\text{mm}$ の5カ所である。回転数を変化させるファンからの吹出口の中心高さと同軸との高さの差を rz とし、一様流での平均風速を V_0 とする。 $rz=0, 175, 250, 400\text{mm}$ の場合の、 $R_p - R_0$ rpm の関係と $V_p - V_0$ m/s との関係から、最小二乗法で直線の傾き a を求めた。さらに、 a と rz の関係も求めた。

以上の結果から、平均風速の重ね合わせが成り立つことを仮定すれば、任意の回転数と高さ z での平均風速 $V(z)$ との関係が以下のように線形的な形で得られる。

$$V(z) = V_0(z) + \sum_i \frac{a_i(R_i - R_0)}{1000} + \sum_j \frac{a_j(R_j - R_0)}{1000} \quad (2.6)$$

$$a_i = 0.87 - 2.58rz_i \times 10^{-3} \quad (2.7)$$

$$a_j = 0.34 - 3.87rz_j \times 10^{-4} \quad (2.8)$$

ここで、

R_0 : 基準回転数(rpm)

$V_0(z)$: 高さ z での回転数 R_0 の一様流の平均風速(m/s)

i, R_i : 回転数が R_0 より大きいファンのチャンネル数とその回転数

j, R_j : 回転数が R_0 より小さいファンのチャンネル数とその回転数

である。

実際に具体例として、各ファンの回転数を任意に定めた際の平均風速の値を測定し、(2.6)式から(2.8)式で求めた値と比較する。ここでは $R_0=1000\text{rpm}$ とし、各ファンの回転数は図 2.7 に示すように設定した。

熱線位置が $z=100\text{mm}$ の場合、(2.7)式、(2.8)式より、

$$a_1 = 0.34 - 3.84(100 - 50) \times 10^{-4} = 0.321$$

$$a_2 = 0.0$$

$$a_3 = 0.87 - 2.58(250 - 100) \times 10^{-3} = 0.483$$

$$a_4 = 0.87 - 2.58(350 - 100) \times 10^{-3} = 0.225$$

$$a_5 = 0.0$$

$$a_6 = 0.87 - 2.58(550 - 100) \times 10^{-3} = -0.291$$

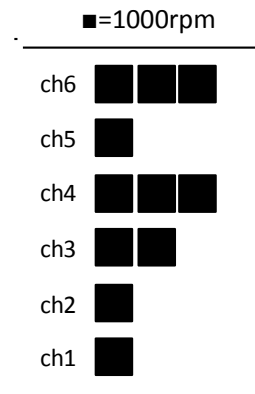


図 2.7 回転数

高さ $z=100\text{mm}$ での回転数 $R_0=1000\text{rpm}$ の一様流の平均風速は

$V_0(100)=2.60\text{m/s}$ で、(2.6)式から、

$$V(100)$$

$$= 2.60 + 0.321(0 - 1) + 0.0 + 0.483(2 - 1) + 0.225(3 - 1) + 0.0 - 0.291(3 - 1)$$

$$= 2.63$$

次に、熱線位置が $z=150\text{mm}$ の場合、

$$a_1 = 0.34 - 3.87(100 - 50) \times 10^{-4} = 0.301$$

$$a_2 = 0.0$$

$$a_3 = 0.87 - 2.58(250 - 150) \times 10^{-3} = 0.612$$

$$a_4 = 0.87 - 2.58(350 - 150) \times 10^{-3} = 0.354$$

$$a_5 = 0.0$$

$$a_6 = 0.87 - 2.58(550 - 150) \times 10^{-3} = -0.152$$

$$V(150)$$

$$= 2.60 + 0.301(0 - 1) + 0.0 + 0.612(2 - 1) + 0.354(3 - 1) + 0.0 - 0.152(3 - 1) = 3.335$$

以下同様に各高さでの平均風速の計算値を求め、測定値と比較した結果が、図 2.8 である。measured_T というのが本研究での $x=1000\text{mm}$ での測定結果である。ただし、喜々津の測定条件と本研究の測定条件は若干異なり、入力電圧に対しての風速が異なっているため、本実験のデータを 1.49 倍し、喜々津での入力電圧と風速の関係に補正した。

値は異なる個所もあるが、おおまかには、平均風速の重ね合わせにより、各ファンの任意の回転数に対する平均風速分布の傾向をつかむことが出来そうである。しかし、本研究でのデータは、計算値よりも風速が高い部分ではさらに高く、低い部分ではさらに低いことが分かった。ただし、これは、 x 方向の測定位置が異なるということが理由である可能性が高いと考えられる。

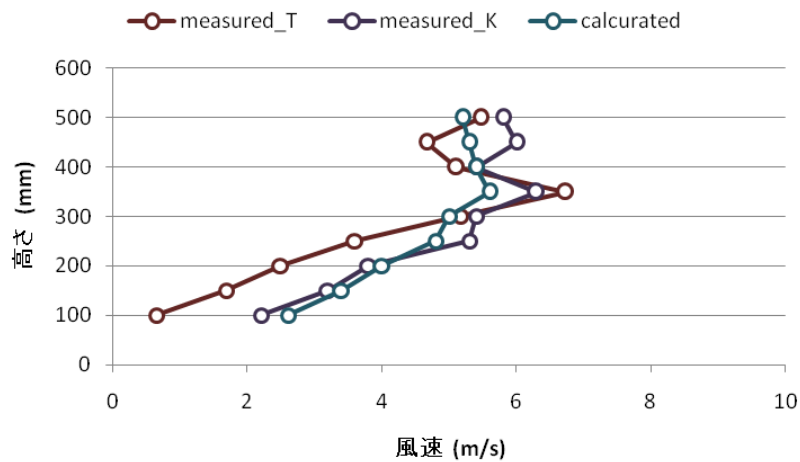


図 2.8 風速の計算値と測定値

以上、各ファンの回転数制御と平均風速との関係を把握したが、ジェット噴射、駆動粗度要素を用いた既往の研究でも同様の検討がなされている。例えば、ジェット噴射を用いた Nagib らの研究²⁾では、床面に対する噴射角と平均風速の鉛直分布との関係などを調べている。また、振動翼列、振動平板を用いた小林らの研究³⁾では、主流方向の乱れを制御する並板列の回転角制御と平均風速との関係を考察しており、回転角の増大とともに平均風速が単調に増加する傾向を明らかにしている。したがって、駆動装置の制御パラメータと平均風速との関係を確認することは、必要不可欠な検討事項であると考えられる。

2. 3. 2 一様流での気流性状の確認

入力電圧に関わらず，一様流での気流性状における測定洞上部と下部では風速が減衰してしまうのが現状である．これは，風洞の特性ではあるが，ファンの回転数を変化させることで，一様流での高さ方向の風速をより一定にすることが出来るかどうかを確認する．

ch1 から ch6 まですべてのファンを一定の回転数にした場合， $x=1000\text{mm}$ では図 2.4 のような気流性状が得られることが分かった．そこで，ch1 と ch6 のファンの回転数を ch2～ch5 よりも上げた場合に，気流性状が高さ方向に関して一定になるかどうかを探るために，ch2 から ch5 を ch1，ch6 の 90%の風速で吹かせた場合，80%の風速で吹かせた場合，70%の風速で吹かせた場合の 3 種類の気流性状を測定する．その結果を図 2.9 に示す．

しかし，結果を見ると，気流性状がファン一定の場合よりも， z 方向に一定になる場合は入力電圧が 2v, 3v, 4v のいずれの場合にも存在しなかった．

したがって，本研究を遂行するにあたり，基準とする気流性状はすべてのファンを一定に運転させた場合が適していることが分かった．

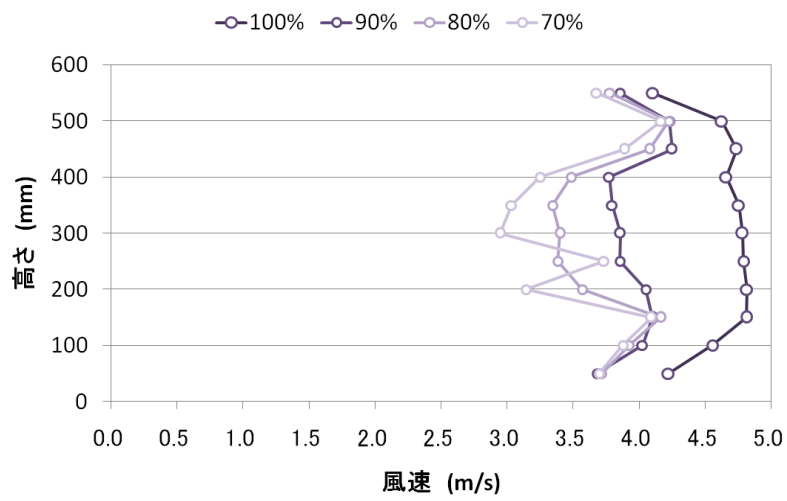
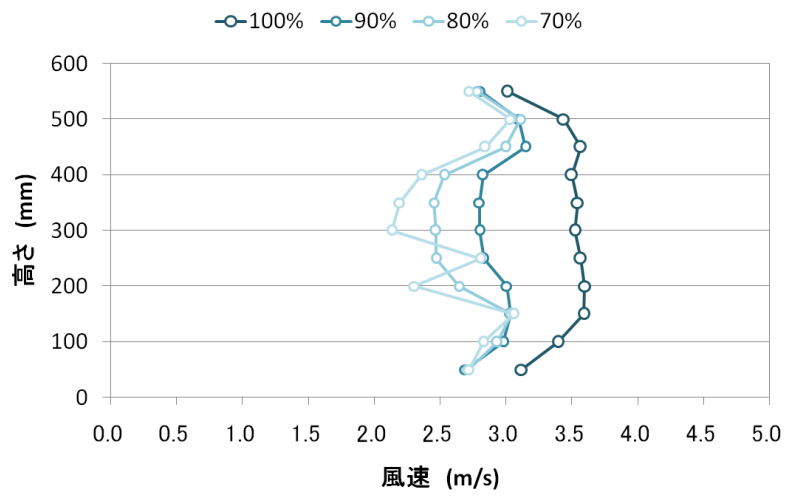
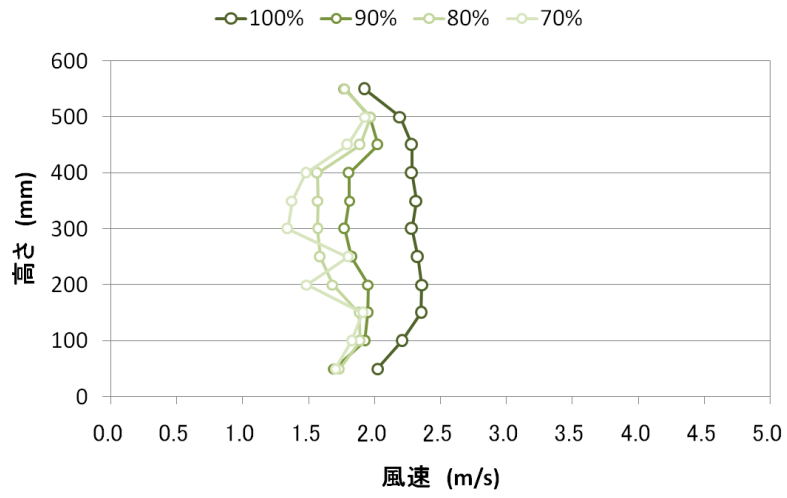


図 2.9 ファンの回転数を変化させた場合の平均風速鉛直分布

参考文献

- 1) 喜々津仁密, 複数ファンを用いた乱流風洞における模擬気流の作成, 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻, 修士論文, 1996
- 2) H.M.Nagib et al., On Modeling of Atmospheric Surface Layers in a Multiple-Jet Wind Tunnel, AIAA Journal, vol.14, no.2, 1976
- 3) 小林紘士・畑中章秀, 2次元風洞実験を対象とした乱流のアクティブシミュレーション, 土木学会論文集 No.432, 1991

■ ■ 3. 可視化実験による風向変化の予想

3. 1 はじめに

空気の流れにしても水の流れにしても目に見えないため、目に見えるようにするために流れの可視化という方法がとられてきた。日常的に経験する流れの可視化としては、やかんから立ち上る湯気やタバコの煙、川面に浮いたごみが流れ去る様子などがある。可視化によって構造物周りの流れの様子を視覚的に知ることが出来れば、流体が構造物にどのように作用するかを知ることが出来るのである。

風工学では、1.3 で述べたようなトレーサー法、タフト法、壁面トレース法などが行われている。また、最近では、可視化データから流速変動を測定出来る手法 PIV(*particle image velocimetry*)も流れ場の観察・計測に用いられている。

本章では、この風洞において実際に風向変化が起こるか、また、どのように変化が起こるかを可視化実験からおおまかに予想する。

3. 2 実験概要

3. 2. 1 測定方法

本風洞は、可視化のために、測定洞の片面が透明アクリル板で作られている。ファンに近い位置で変化が起こることを前提に $x=0\text{mm}$ から 1200mm の範囲をデジタルビデオカメラを用いて撮影した。可視化には、発煙筒(国際化工株式会社, 自動車用緊急保安炎筒)を用いて煙を発生させ、その煙を各ファンの上流から流しこんだ。

風の動きが分かりやすいように、ファンへの入力電圧は 0.5v とした。一定の電圧でファンを動かし、一様流の状態を作ったあと、ファンを停止し、どのような風向変化が起こるかを確認した。

3. 2. 2 測定ケース

撮影したケースについて、図 3.1 に示す。図はそれぞれのケースごとに、横軸を時間(秒)とした時の各ファンの動きを表している。白色が動いていない状態を示しており、黒色が最大風速を吹かせている状態である。すなわち、case001 とは、2 秒間ですべてのファンを起動させ、10 秒間一様流を吹かせたあと、2 秒間で ch1 のファンを止めた場合である。同様に、case002 は ch1, ch2 のファンを止めた場合、case003 は ch1, ch2, ch3 を止めた場合である。

ちなみに、caseWXY_z において、W は下部、X は中心部、Y は上部の変化するファンの数を表し、z は変化時間を表すことを前提にケース名を決定している。

それぞれのケースについて、ch1 から ch6 の順に発煙筒の煙を流し込み、6 回ずつ計 18 回の実験を行った。

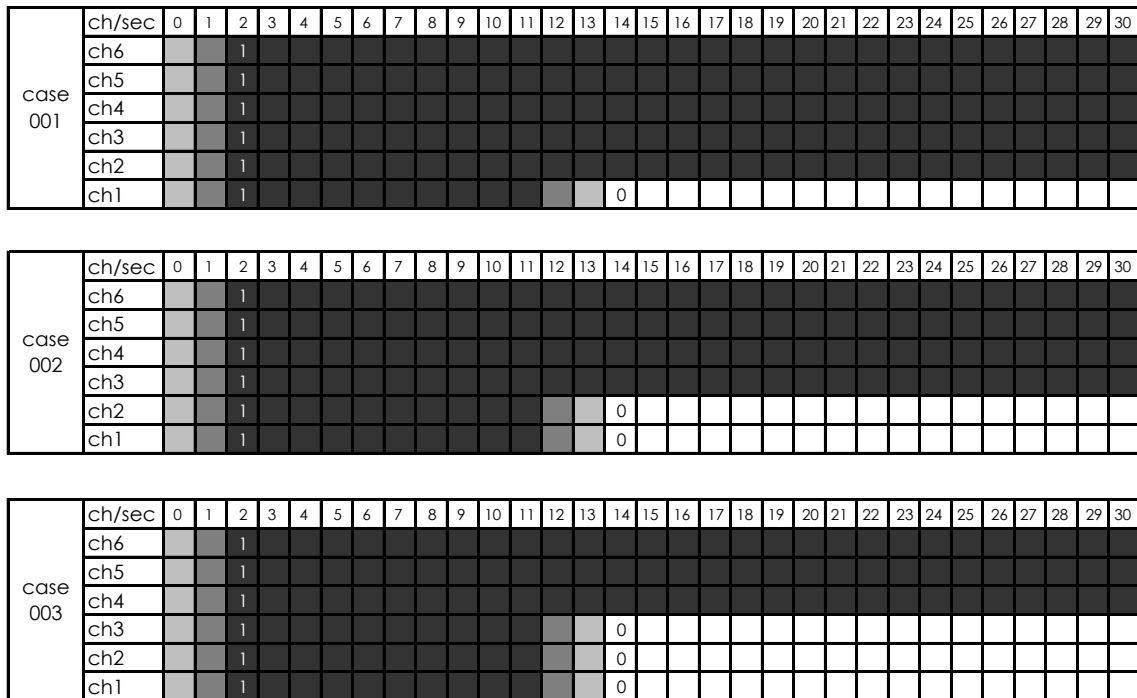


図 3.1 可視化実験の測定ケース

3. 3 実験結果及び考察

この実験では、6個のファンのうち下部に位置するファンを停止しているため、風向変化が最も大きくなるのは停止したファンの少し上に位置する高さにおいてである可能性が高い。すなわち、case001におけるch2、case002におけるch3、case003におけるch4に着目して考察を行う。

まず、case001におけるch2の10秒後から17秒後までを撮影した映像を1秒間隔で取り出したものを示す(図 3.2)。同様に、case002におけるch3(図 3.3)、case003におけるch4(図 3.4)も示した。それ以外のチャンネルについては、本論の最後に付録として掲載する。

次に、測定洞 $x=0\text{mm}$ から $x=2000\text{mm}$ の間のボルトの位置に相当する、 $x=216\text{mm}$, 432mm , 648mm , 864mm , 1080mm の5カ所における煙の幅を測定し、気流の幅がどのように変化しているかを調べた。同様に、case001におけるch2(図 3.5)、case002におけるch3(図 3.6)、case003におけるch4(図 3.7)について結果を示す。図 3.4 から図 3.7 はすべて、上から順に $x=216\text{mm}$, 432mm , 648mm , 864mm , 1080mm のときの気流の幅を示しており、風洞上流端における各気流の吹出口の幅を ± 1 として基準化してある。

10 秒後



14 秒後



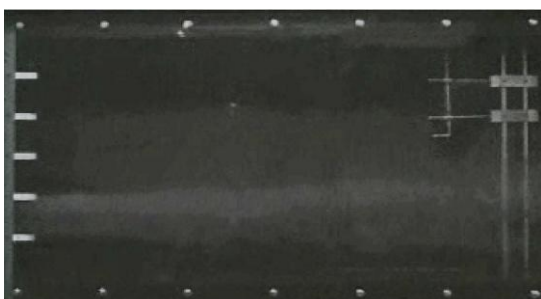
11 秒後



15 秒後



12 秒後



16 秒後



13 秒後



17 秒後



図 3.2 case001 における ch2 の変化

10 秒後



14 秒後



11 秒後



15 秒後



12 秒後



16 秒後



13 秒後



17 秒後



図 3.3 case002 における ch3 の変化

10 秒後



14 秒後



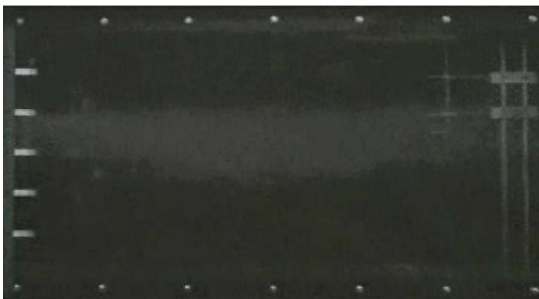
11 秒後



15 秒後



12 秒後



16 秒後



13 秒後



17 秒後



図 3.4 case003 における ch4 の変化

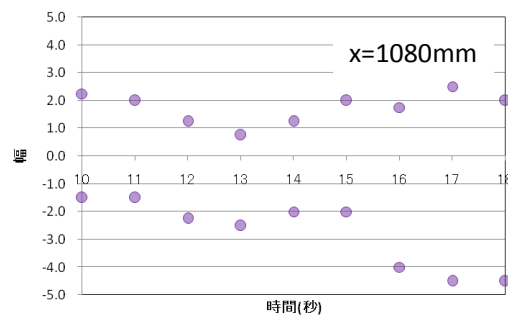
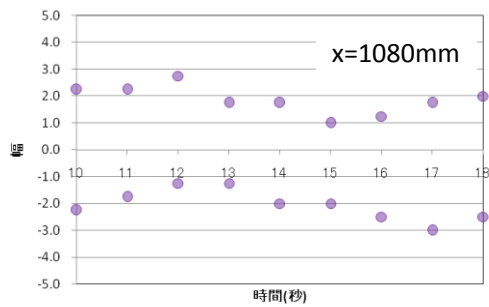
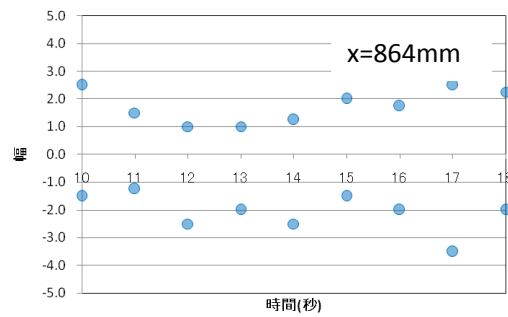
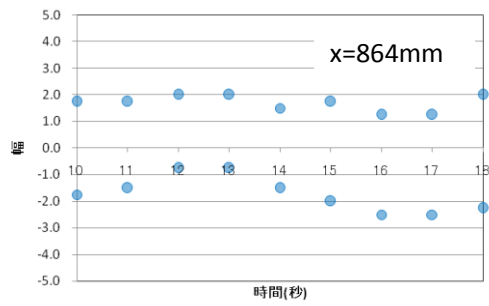
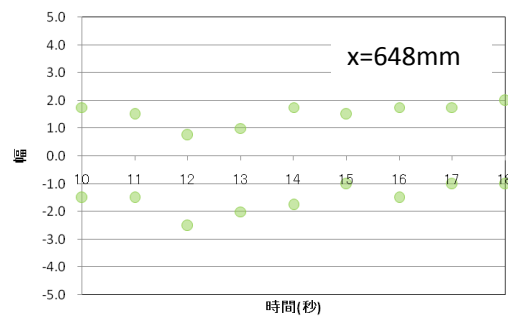
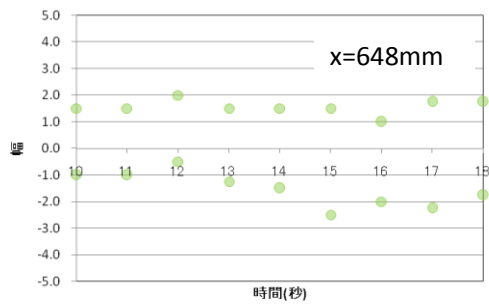
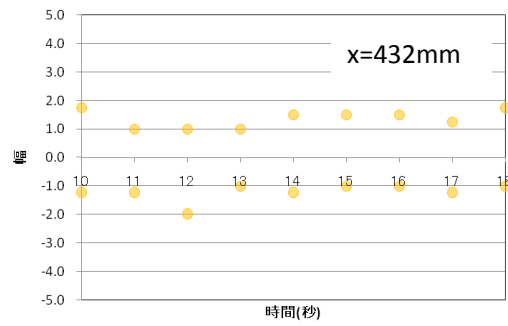
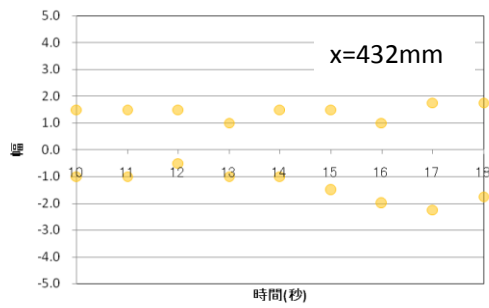
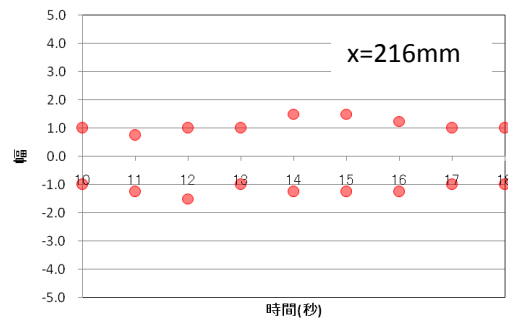
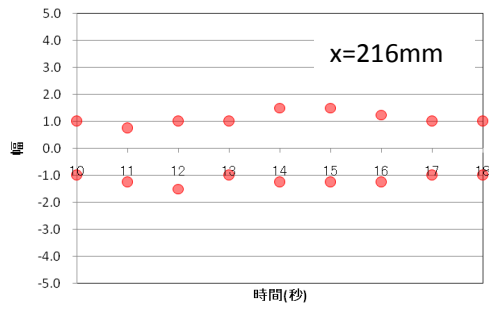


図 3.5 case001 における ch2 の気流幅の変化

図 3.6 case002 における ch3 の気流幅の変化

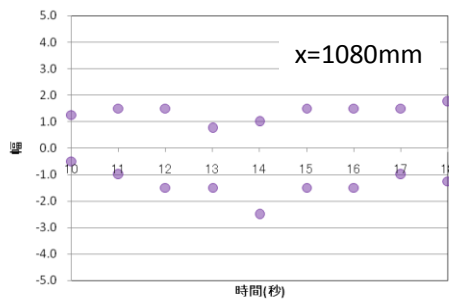
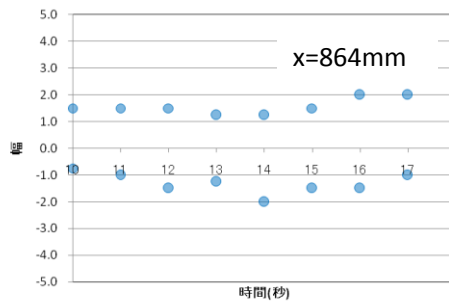
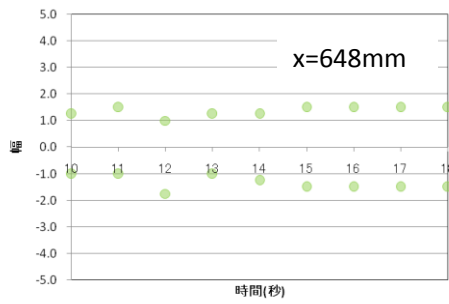
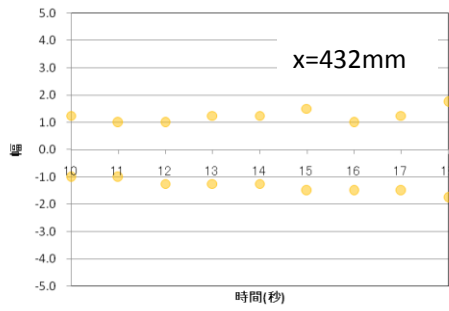
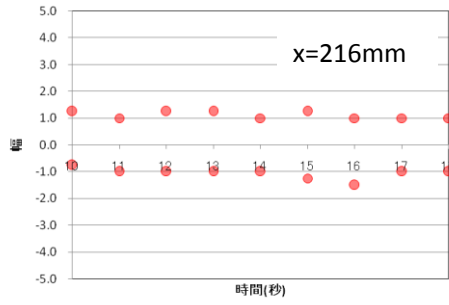


図 3.7 case003 における ch4 の気流幅の変化

図 3.5 に示したように、case001 の ch2 については、ファンに近い位置では変化が見られなかった。x=432mm, 648mm では、14 秒から 16 秒で煙の幅が大きくなっている。その変化は煙の上端より下端の方が大きかったことから、下向きに気流が広がったことを示している。x=864mm, 1080mm では 14 秒から 17 秒にかけ、煙の幅が大きくなっているが、煙の上端も少し下がっていることから、気流が全体的に下向きに流れたということが予想される。

図 3.6 に示したように、case002 の ch3 については、x=216mm, 432mm, 648mm の位置では大きな変化は見られなかった。しかし、x=864mm, 1080mm では 15 秒から 17 秒にかけて大きな変化が見られ、気流が大きく下向きに流れ込んでいることが分かる。

図 3.7 に示したように、case003 の ch4 については、x=864mm, 1080mm で変化が現れた。しかし、その変化は case001, case002 に対して大きくなると予想していたのだが、そうではないことが分かった。ある程度下向きに流れ込む気流は確認出来たものの、下部で気流が渦を巻いていたり、もともとの風の流れに沿って流れ続ける風も確認出来た。

これらから、本風洞においてファンを停止した場合に気流が流れ込む様子が確認出来、数十度の風向変化が起きていそうであるということが予想できる。また、その変化は主に x=864mm, 1080mm ではっきりと起こっていることが分かった。

3. 4 おわりに

本章では、本風洞において風向変動が起こるかどうかを予想するため、可視化実験を行った。

その結果、どのケースにおいてもファンを止めた位置の上部で風向が下向きに変化している様子が確認出来た。

まず、2秒間ですべてのファンを起動させ、10秒間一様流を吹かせたあと、2秒間で ch1 のファンを止めた case001 では少し下向きに流れる様子が確認出来た。

次に、2秒間ですべてのファンを起動させ、10秒間一様流を吹かせたあと、2秒間で ch1, ch2 のファンを止めた case002 ではその風向変化が、case001 に比べ、大きくなっているように感じられた。

そして、2秒間ですべてのファンを起動させ、10秒間一様流を吹かせたあと、2秒間で ch1, ch2, ch3 のファンを止めた case003 では、他のケースに比べ、変化ははっきりと確認出来たが、 $z=0\text{mm}$ から 300mm のファンを止めた高さにおいて、気流が渦を巻いているような現象も見られ、他の2つのケースに比べ、乱れが大きいように感じた。

これらから、本風洞において少しではあるが風向変化が起こっていることが確認出来、数10度の変化が起きていそうだと見える。また、その変化は $x=800\text{mm}$ から 1000mm で最も顕著に表れていることが分かった。

■ ■ 4. 風向變動實驗

4. 1 はじめに

3章では、本風洞において風向変化を起こせることがおおまかに確認された。その予想に基づいて、本章では、 $x=1000\text{mm}$ における詳細な風向変化を測定する。実測に基づいた値から必要な風向変化を風洞に要求することは、自然風の特徴を知るために必要不可欠である。しかし、本風洞は風向変動を目的に製作されたわけではないので、まずは、どの程度の風向変化が起こり得るかを測定する。ただし、前述したように、現実の風における数10度程度の継続的な風向変化を目標にしていることは言うまでもない。また、1.3で詳しく述べたように、近年、風向変動の重要性が唱えられており、いくつかの研究が行われている。風向変動と関わりが深いいくつかの研究の概要を、ここでもう一度確認する。

野村らによる「ACサーボモータでファンを駆動する風洞による風速風向変動の生成」¹⁾や「風向が時間変化する気流による非定常空気力の測定」²⁾では、送風機を挟角45度で3本配置し、2本ずつの気流を合成させることにより、 ± 45 度の範囲で風向を時間変化させることが出来る装置を作成している。この研究では、この装置を用いて正方形角柱に作用する空気力に対する風向の時間変化率の影響を測定しているが、ここで着目したいのは、実験に用いた合成気流の1つである。風速がほぼ一定(12m/s)のまま、1秒間で、風向が-45度から+45度まで変化する気流をこの風洞では実現している。

久保らによる「圧力勾配方向の制御による風向変動風洞の試作」³⁾では、実験を行う中央の円盤状の測定部と、それを囲むように放射状に配置された8個の流出風路と8個の流入風路により構成された風洞を用いている。「風向変動風洞の風向変化性能の検討」⁴⁾では、手動で行っていたシャッターの開閉をコンピュータ制御に変え、計測を行っている。その結果、単風路では平均風速3.4m/sで42.9度の風向変化を、2風路では平均風速2.0m/sで21.7度の風向変化を生じさせることに成功している。

以上の2つは、風向変化を持つ気流そのものを作り出すための研究であるが、谷池らによる「瞬間的な風向変化により外装材に作用する風圧力」⁴⁾では、模型を一定方向に45度回転させることにより風向変化の状態を作り出している。この研究については前述していないため、ここで概要を述べる。

実験は、大阪市立大学にある幅1500mm×高さ1200mmのエッフェル型風洞を用いて行われている。実験に用いた模型は、図4.1に示したように一辺が100mmの立方体模型であり、風洞底面付近で発達する境界層の

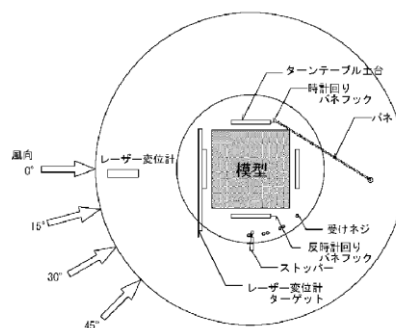


図 4.1 模型と仕組み

影響を避けるため、底面より 200mm 上部に設置されている。ベアリングにより支持された回転可能なターンテーブル上に模型を設置し、外側の固定されたターンテーブルとバネで繋がれている。バネの引張力を利用して模型が回転し、ストッパーにより制御される仕組みである。回転の状態は、模型下部に取り付けられたターゲットとレーザー変位計の距離を同時測定し、幾何学関係により角度に換算している。また、模型回転角度は、回転開始角 45 度から回転終了角 0 度とする。

これを用いて、外装材を対象とした風圧がどのような性状を示すかを考察している。風向変化前の風向が建物の隅角部方向からで、屋根面に比較的安定した円錐渦が存在する状態で瞬間的に風向が変化する場合に、その円錐渦が風下にストレッチ以降されるという現象によって屋根面に強い負の圧力場が形成されると考えられる。この場合に、発生する最大ピーク外圧係数は-3.5 であり、風向固定時のピーク外圧係数に比べ、約 2 倍から 3 倍の値を示すことが確認されている。また、風向変化が瞬間的であるほど、ピーク外圧係数は高い負圧を示す傾向にあることが分かっている。

このように風向変化を目的としたアクティブ型風洞の開発や、工夫をして従来の風洞で風向変化を発生させる研究が進んでいる。しかし、その一方で風向変動を作成する実験の確立した手法は存在していないのが現状である。

そこで、本章では、アクティブ型風洞の 1 つである複数ファンを持つ本風洞においてどの程度の風向変化が起きるかを測定する。

4. 2 実験概要

4. 2. 1 測定方法

コンピュータは風速測定用とファンの回転数制御用とで 2 台用意した。回転数制御と風速測定は以下の機器を用いて行った(表 4.1)。測定機器の構成については図 4.2 に示す。

表 4.1 測定機器

x 型熱線風速計	KANOMAX MODEL 0252R-T5 Serial No. 1009-1012
プローブサポート	KANOMAX Probe Support 0167
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
オシロスコープ	YOKOGAWA DL750 Scope Corder MODEL 701210
圧力計	DIGITAL MANOMETER MODEL PZ-77 Serial No. C-41
測定用コンピュータ	DELL OPTIPLEX 270
制御用コンピュータ	DELL DIMENSION 9150

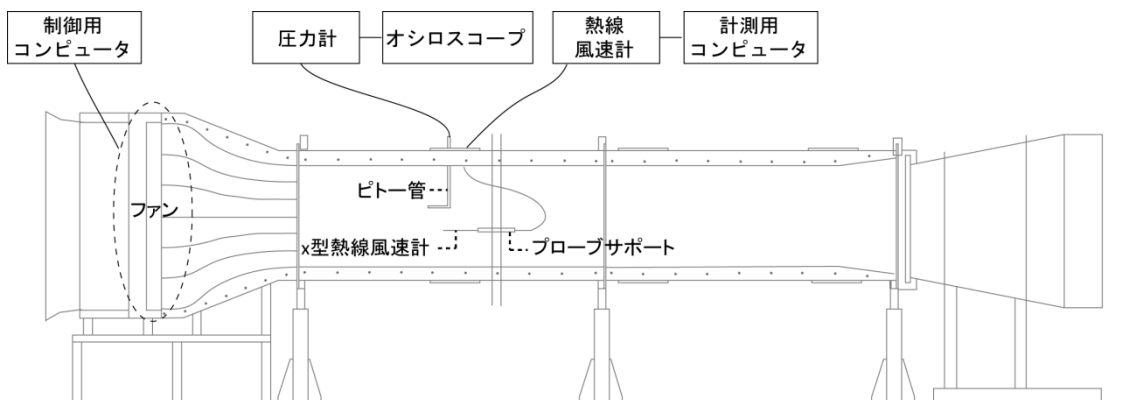


図 4.2 測定機器の模式図

ピトー管で測定された風速をもとに、x型熱線風速計のキャリブレーションを行うが、本風洞ではピトー管とx型熱線風速計を同じ高さに設定することが出来ないため、先にピトー管を用いて風速を測定し、そのデータをもとにx型熱線風速計のキャリブレーションを行っている。

x型熱線風速計で測定されたデータは、熱線風速計で補正が行われたあと、測定用コンピュータに出力される。ここでは、主流方向の風速の時刻歴変化と主流直角方向の風速の時刻歴変化が出力される。ここでの補正については、本論の最後に付録として掲載する。

4. 2. 2 測定ケース

(1) ファンを停止した場合

本風洞において風向変化の実験を行った前例はないため、単純にファンを停止するケースから測定した。3章における可視化実験で用いた3ケースに加え、中段のファンを停止した3ケース、上段のファンを停止した3ケースの計9ケースを以下に示す(図4.3)。縦軸が各ファンのチャンネル(ch)を表しており、秒ごとのファンの回転数を視覚的に表している。横軸は時間経過を表しており、単位は秒である。白色は止まっている状態、黒色は最大で回転している状態である。

例えば、case001では、0秒から2秒にかけて全てのファンを始動し、12秒までの10秒間、一定に回転させた後、14秒までの2秒間でch1のみを停止している。

ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
case 001			1																													
ch6			1																													
ch5			1																													
ch4			1																													
ch3			1																													
ch2			1																													
ch1			1												0																	

ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
case 002			1																													
ch6			1																													
ch5			1																													
ch4			1																													
ch3			1																													
ch2			1												0																	
ch1			1												0																	

ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
case 003			1																													
ch6			1																													
ch5			1																													
ch4			1																													
ch3			1												0																	
ch2			1												0																	
ch1			1												0																	

ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
case 010a			1																													
ch6			1																													
ch5			1																													
ch4			1												0																	
ch3			1																													
ch2			1																													
ch1			1																													

case 010b	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	ch6			1																													
	ch5			1																													
	ch4			1																													
	ch3			1													0																
	ch2			1																													
	ch1			1																													

case 020	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	ch6			1																													
	ch5			1																													
	ch4			1													0																
	ch3			1												0																	
	ch2			1																													
	ch1			1																													

case 100	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	ch6			1												0																	
	ch5			1																													
	ch4			1																													
	ch3			1																													
	ch2			1																													
	ch1			1																													

case 200	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	ch6			1												0																	
	ch5			1												0																	
	ch4			1																													
	ch3			1																													
	ch2			1																													
	ch1			1																													

case 300	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	ch6			1												0																	
	ch5			1												0																	
	ch4			1												0																	
	ch3			1																													
	ch2			1																													
	ch1			1																													

図 4.3 ファンを停止した 9 種類の測定ケース

(2) ファンの停止時間を変化させた場合

ファンを停止した9種類の測定ケースでは、ファンを2秒間で停止させている。これは、ファンの性能から2秒以下で停止させると、入力に対してのファンの追随性が低下するからである。瞬間的にファンの動きを変化させると、実際よりも多くの乱れを与える可能性が高いことから、ファンの停止時間を変えることによって、風の乱れや既往の研究においても問題になっていた風向角のオーバーシュートの検討を行った。

測定ケースはcase001を基本に、ファンを停止した9種類のケースと同じく2秒で停止したcase001_f2(case001と同じ)、5秒で停止したcase001_f5、10秒で停止したcase001_f10、15秒で停止したcase001_f15の4ケースとした(図4.4)。

	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
case 001 _f2	ch6			1																															
	ch5			1																															
	ch4			1																															
	ch3			1																															
	ch2			1																															
	ch1			1													0																		

	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
case 001 _f5	ch6			1																																
	ch5			1																																
	ch4			1																																
	ch3			1																																
	ch2			1																																
	ch1			1																0																

	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
case 001 _f10	ch6			1																																	
	ch5			1																																	
	ch4			1																																	
	ch3			1																																	
	ch2			1																																	
	ch1			1																								0									

	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
case 001 _f20	ch6			1																																	
	ch5			1																																	
	ch4			1																																	
	ch3			1																																	
	ch2			1																																	
	ch1			1																																	

図 4.4 ファンの停止時間の異なる4種類の測定ケース

(3) ファンを強めた場合

これまででは、全てのケースでファンを停止させることによって風向を作り出している。ファンを強めた場合に、どの程度の風速変化が起こるかを確認するために、case010a+, 010b+, 020+の3ケースを測定した(図 4.5)。これは、具体的には突風のような場合を想定している。例えば、case010a+では、12秒から14秒の2秒間で、ch4の回転数を増加させている。

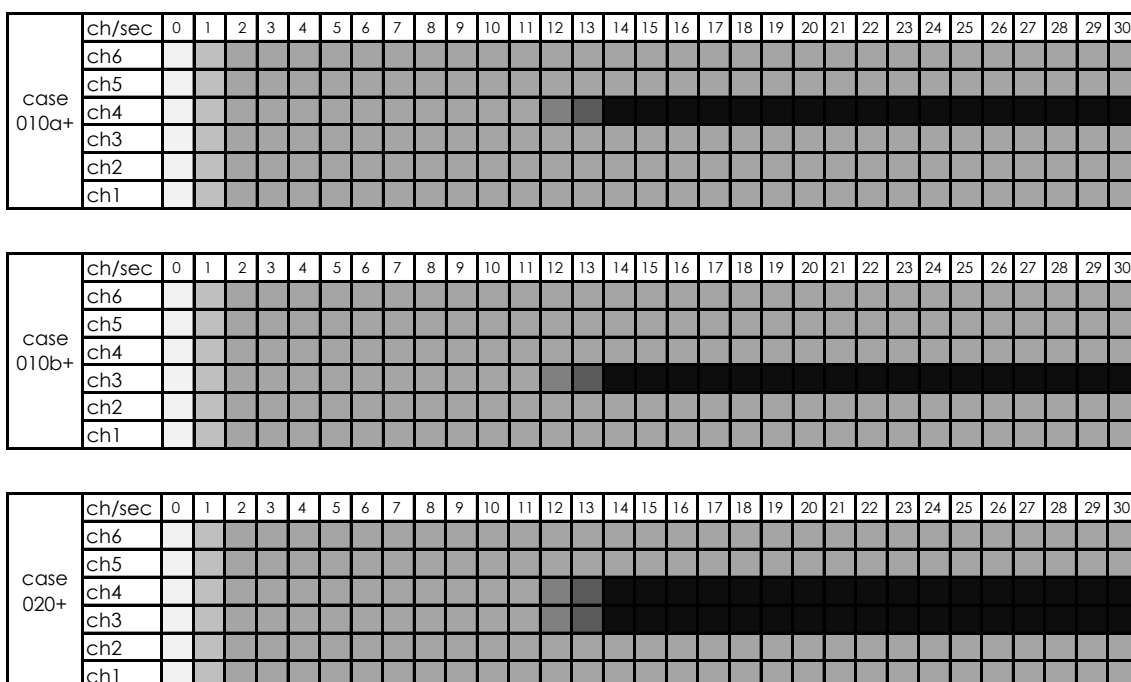


図 4.5 ファンを強めた3種類の測定ケース

(4) ファンの強弱を組み合わせた場合

これまでにファンを停止したケース、ファンを強めたケースを測定した。これらを踏まえ、ファンの強弱を組み合わせた case002A, case002B を測定する(図 4.6)。case002A は、ch1, ch2 の回転を停止すると同時に、ch3, ch4 の回転数を少し上げ、ch5, ch6 の回転数をさらに上げる(図 4.7)。case002B は、ch1, ch2 の回転を停止すると同時に、ch3 から ch6 の回転数に差を付け、高い位置ほど気流が早く流れるよう段階的に回転数を設定する(図 4.8)。こうすることで、より大きな風向変動が期待出来るからである。また、変化前後に大きな流量の変化があると乱れを発生させる可能性が高くなることが予想されるため、それを踏まえて、ファンへの入力電圧を調整した。

ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30						
case 002A	ch6			1																																	
	ch5			1																																	
	ch4			1																																	
	ch3			1																																	
	ch2			1												0																					
	ch1			1												0																					
	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
case 002B	ch6			1																																	
	ch5			1																																	
	ch4			1																																	
	ch3			1																																	
	ch2			1												0																					
	ch1			1												0																					

図 4.6 ファンの強弱を融合した 2 種類の測定ケース

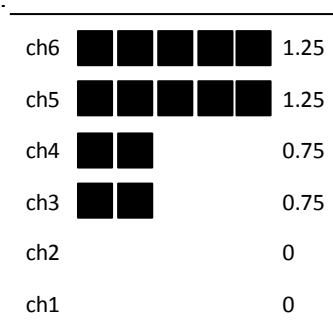


図 4.7 case002A のファンの回転数

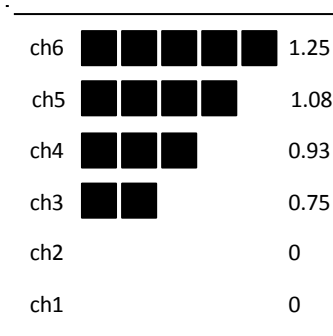


図 4.8 case002B のファンの回転数

4. 3 実験結果

図 4.9 から図 4.62 に、すべてのケースの結果を示す。

凡例の 1 から 30 の数値は、測定時間の 1 秒から 30 秒を表している。

風速の違いについては、気流を変化させない場合には、風速の大きさに比例していることが確認されているが、気流を変化させた場合についてその関係が成立するかどうかについては確認されていないため、ファンを停止した 9 種類のケースに対しては、2 種類の風速を用いて実験を行った。入力電圧は 2v と 4v である。この場合、結果の図の配置は、上段が 2v の結果、下段が 4v の結果である。また、左頁が、風速の時間変化を示したもので、これは x 型熱線風速計の主流方向の風速と鉛直方向の風速から合成した風速を算出したものである。右頁は、風向角の時間変化を示したものであり、これも x 型熱線風速計の主流方向の風速と鉛直方向の風速から求めたものである。

ファンの変化についての 4 種類のケースは、ファンの変化時間による変化の違いを見ることが目的であるので、入力電圧 4v で行った。また、ファンを強めた 3 種類のケースは、最初の状態から風速を増加させることを考慮して入力電圧 2v で行った。この場合、結果の図の配置は、上段が風速、下段が風向角である。

また、結果はすべて 4 回のアンサンブル平均をとったものである。

(1) ファンを停止した場合

case001_2v_1000 (風速)

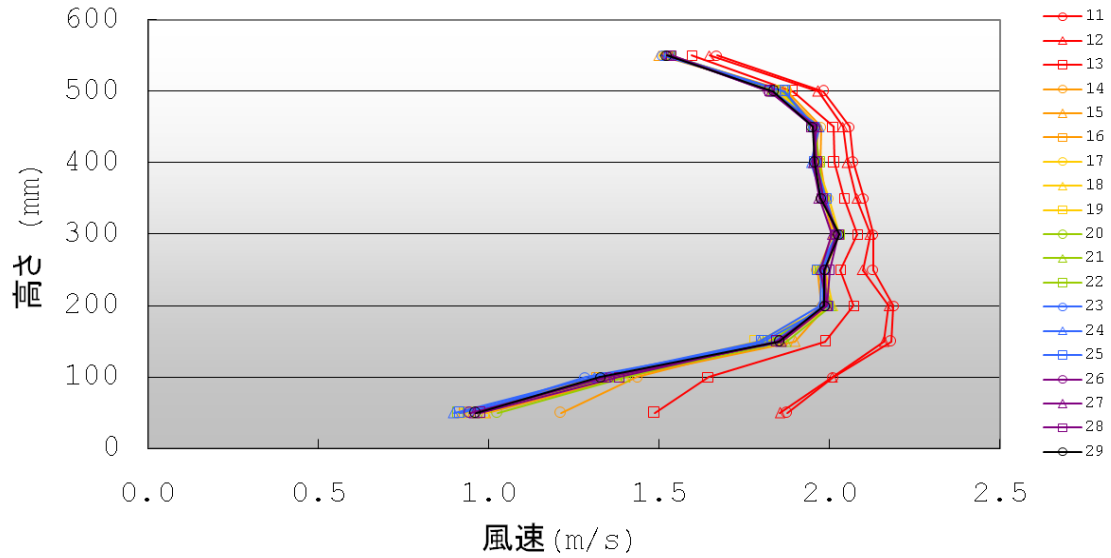


図 4.9 case001 の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

case001_4v_1000 (風速)

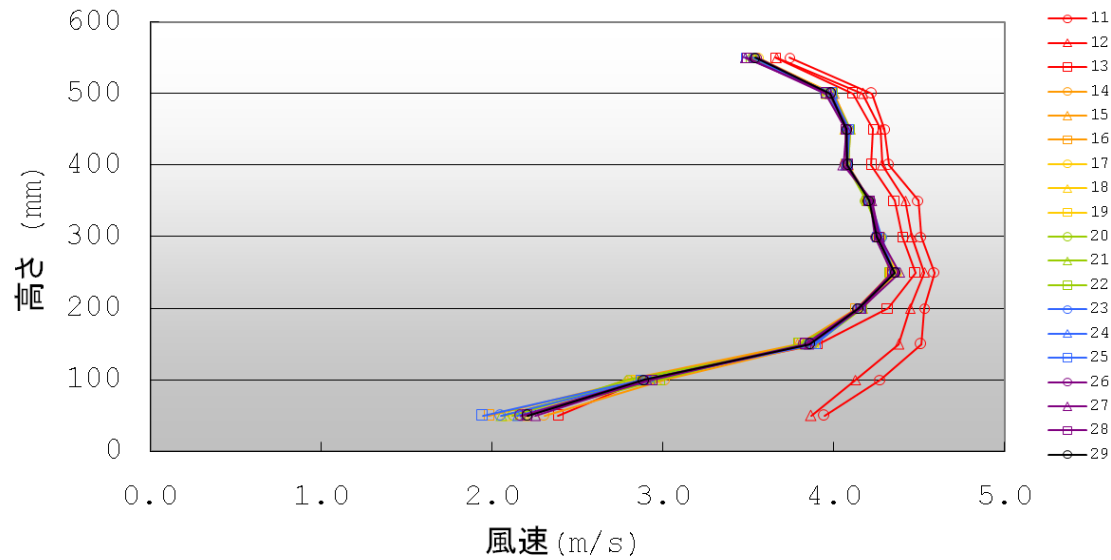


図 4.10 case001 の時間経過による風速変化(入力電圧4v)

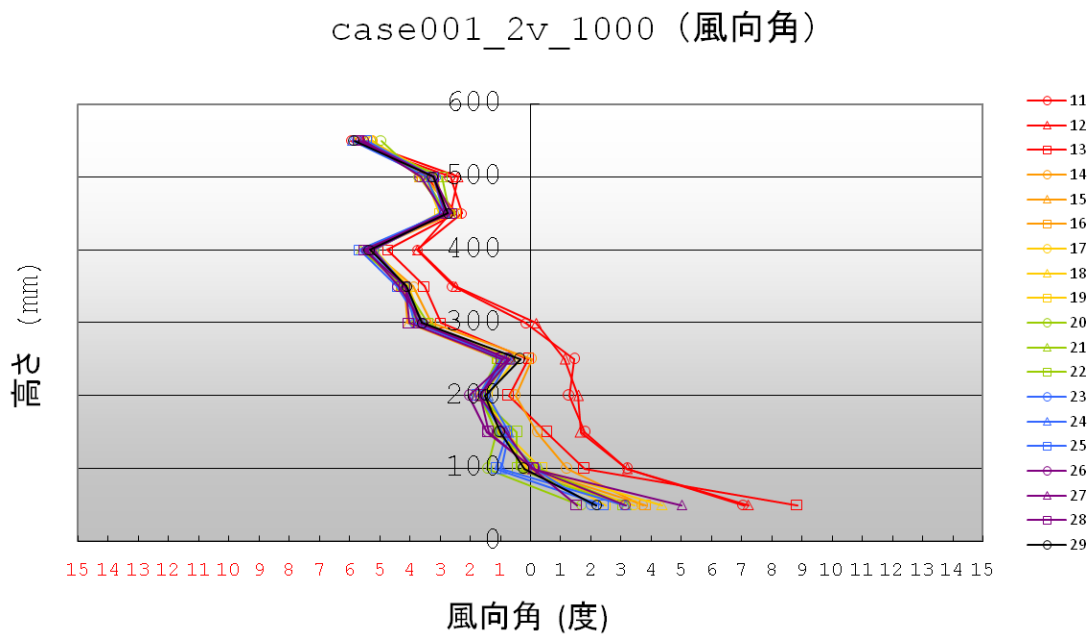


図 4.11 case001 の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

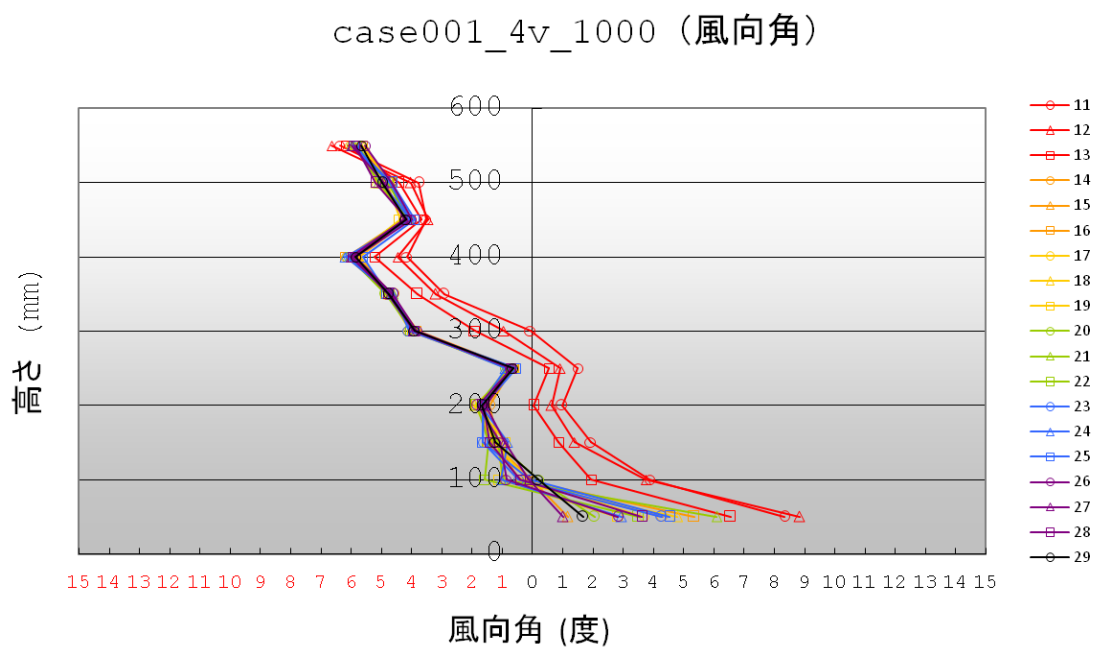


図 4.12 case001 の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

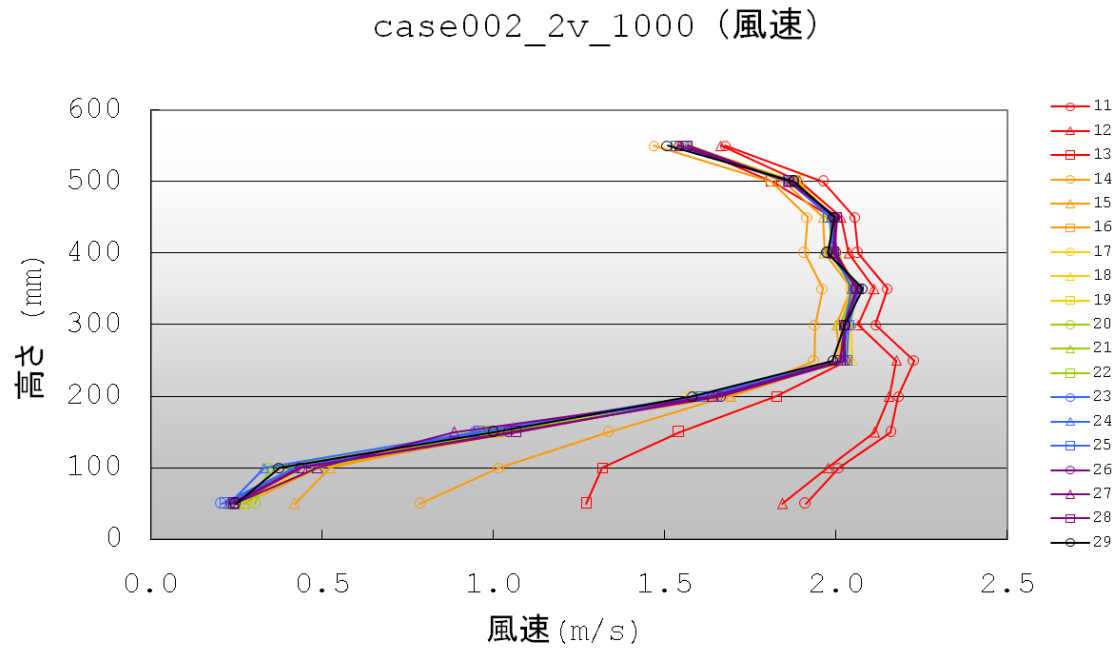


図 4.13 case002 の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

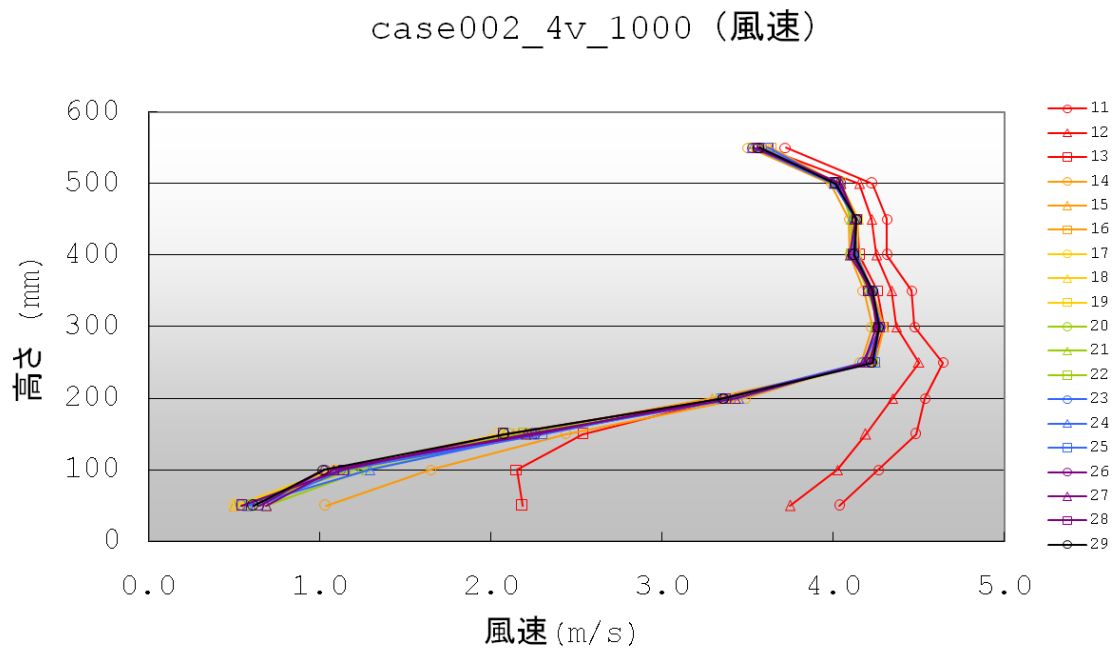


図 4.14 case002 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

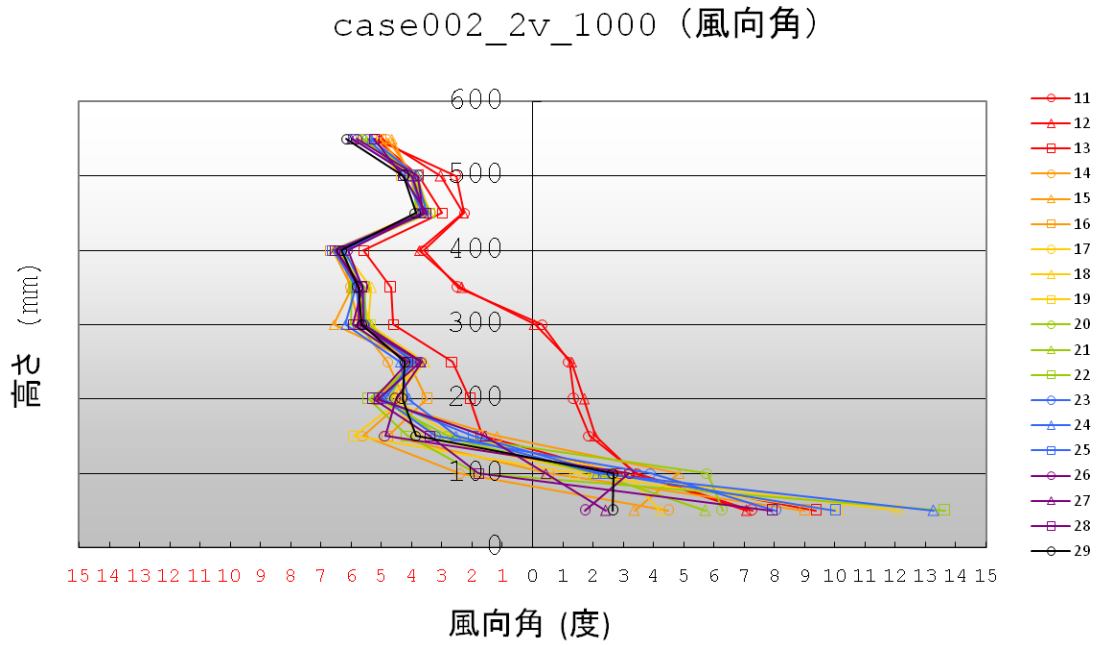


図 4.15 case002 の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

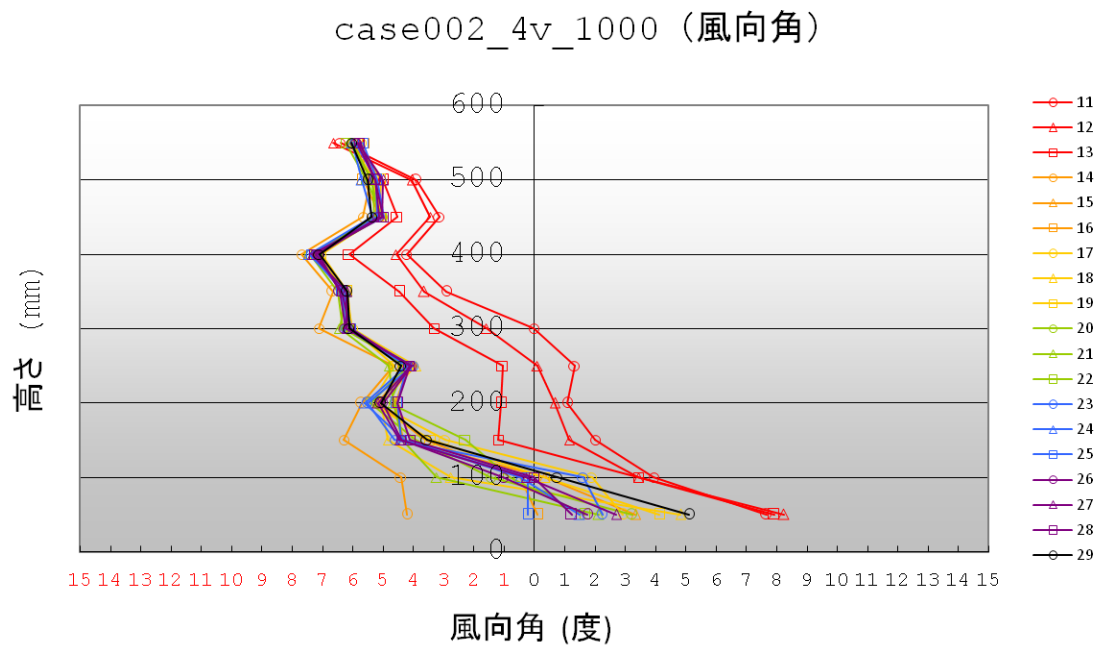


図 4.16 case002 の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

case003_2v_1000 (風速)

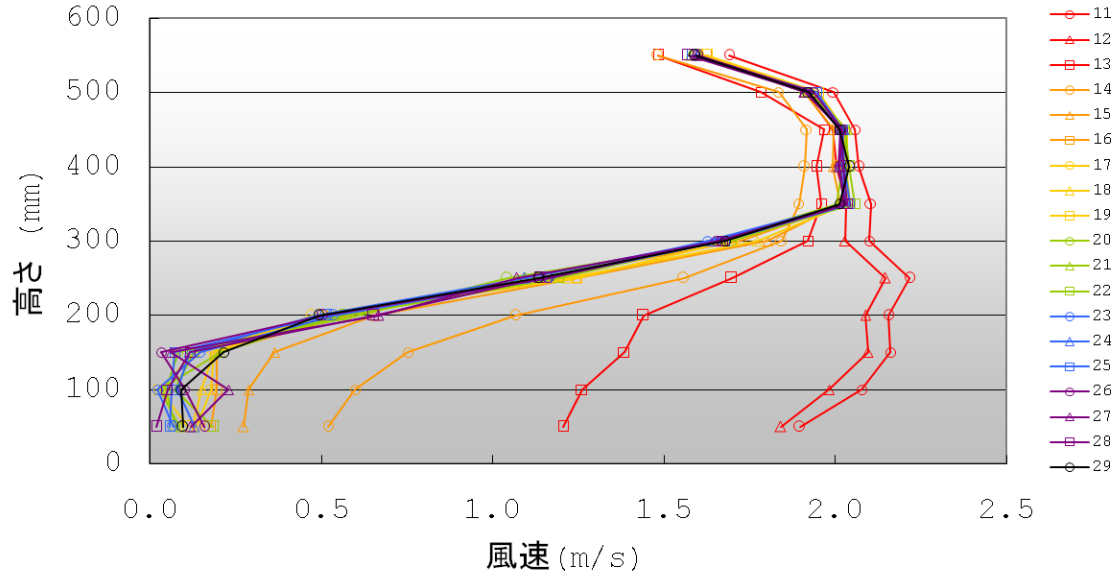


図 4.17 case002 の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

case003_4v_1000 (風速)

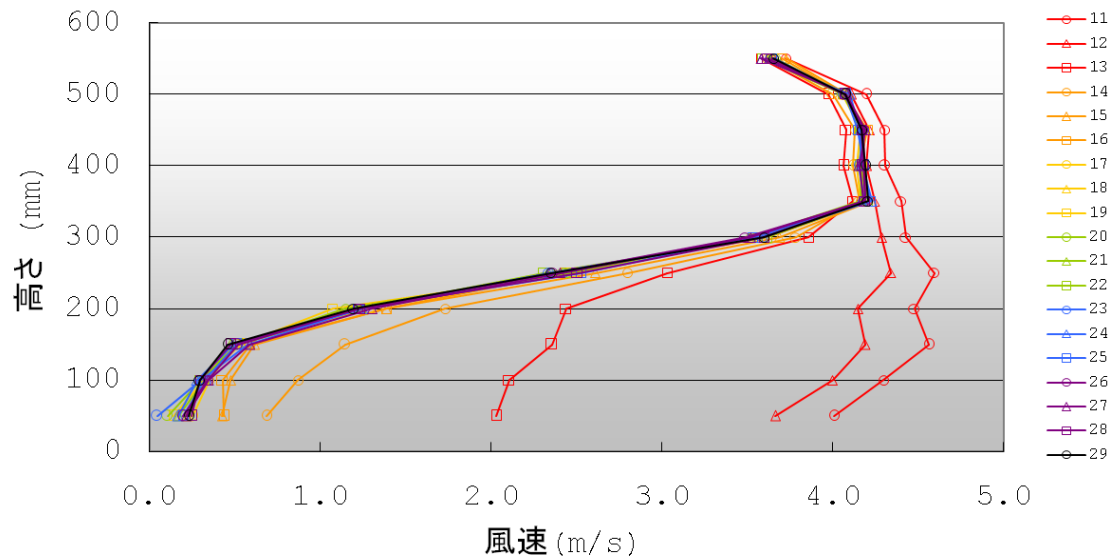


図 4.18 case002 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

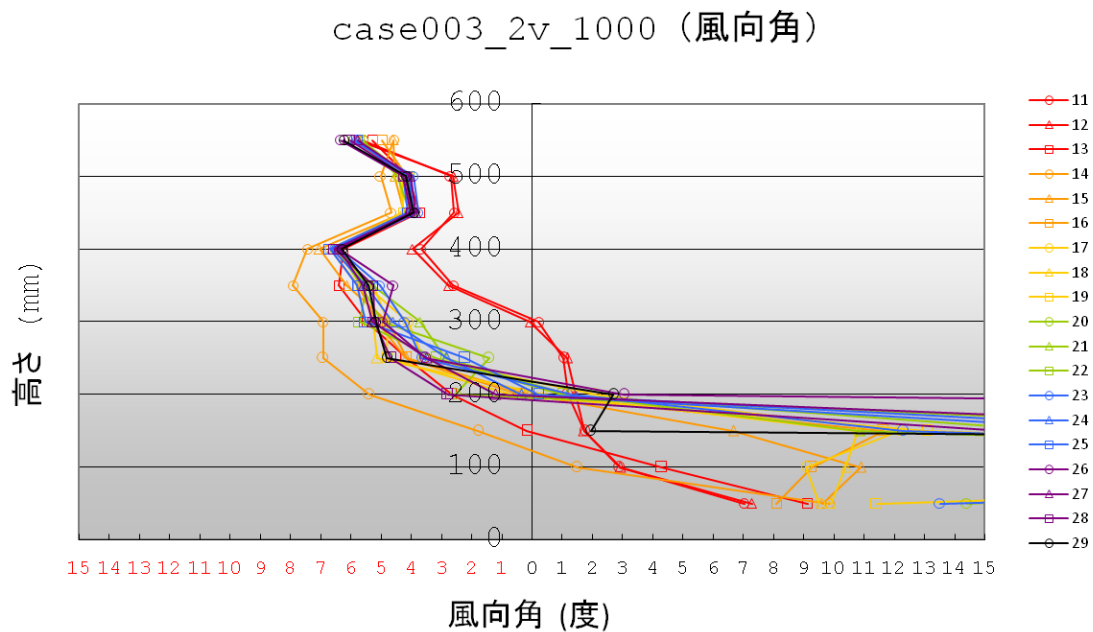


図 4.19 case003 の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

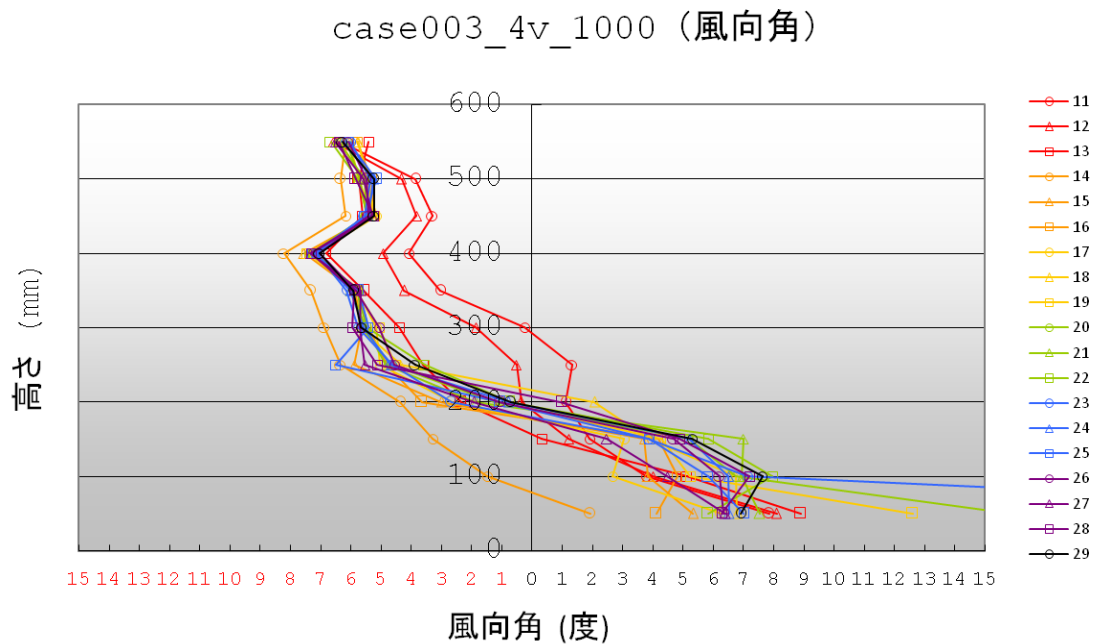


図 4.20 case003 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

case010a_2v_1000 (風速)

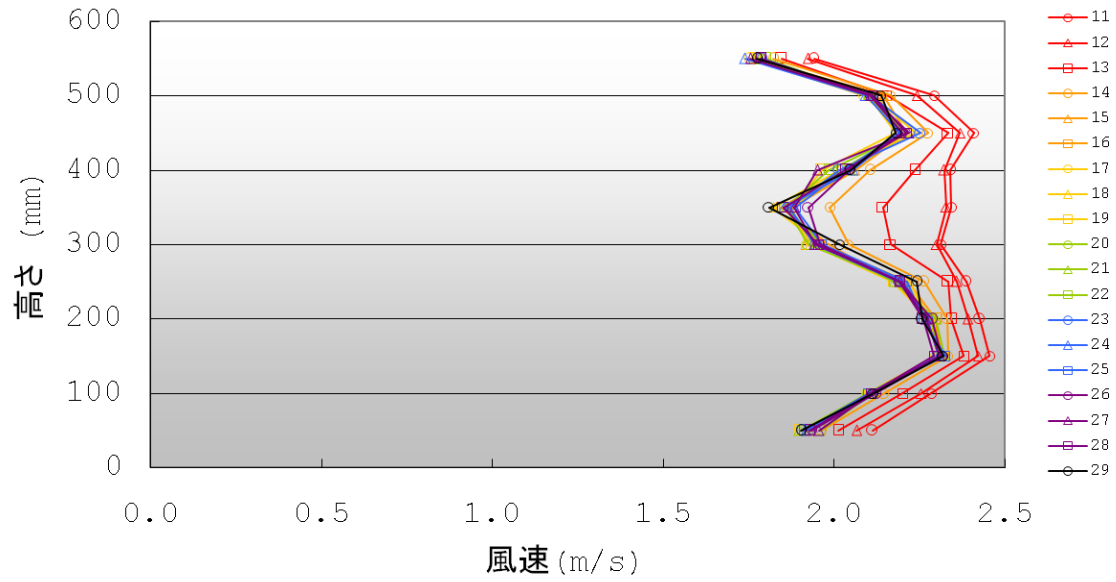


図 4.21 case010a の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

case010a_4v_1000 (風速)

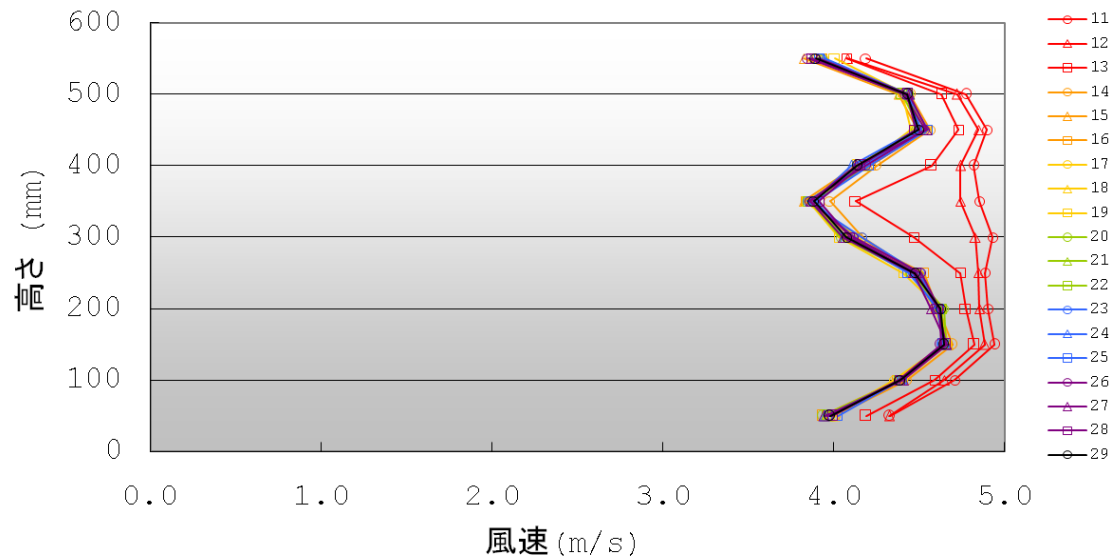


図 4.22 case010a の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

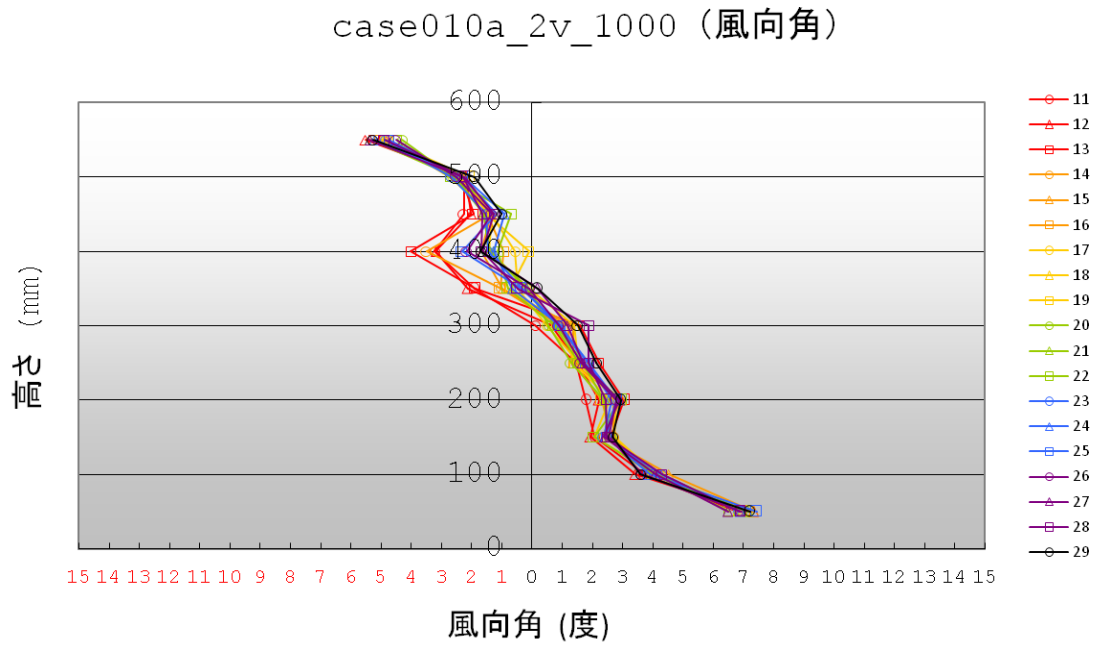


図 4.23 case010a の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

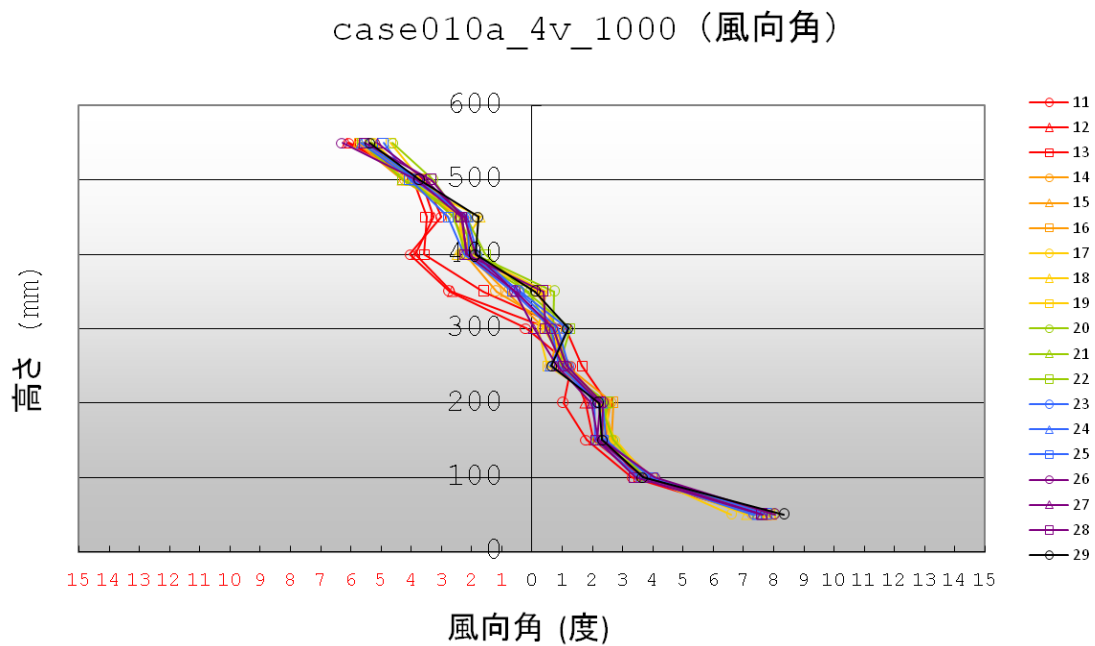


図 4.24 case010a の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

case010b_2v_1000 (風速)

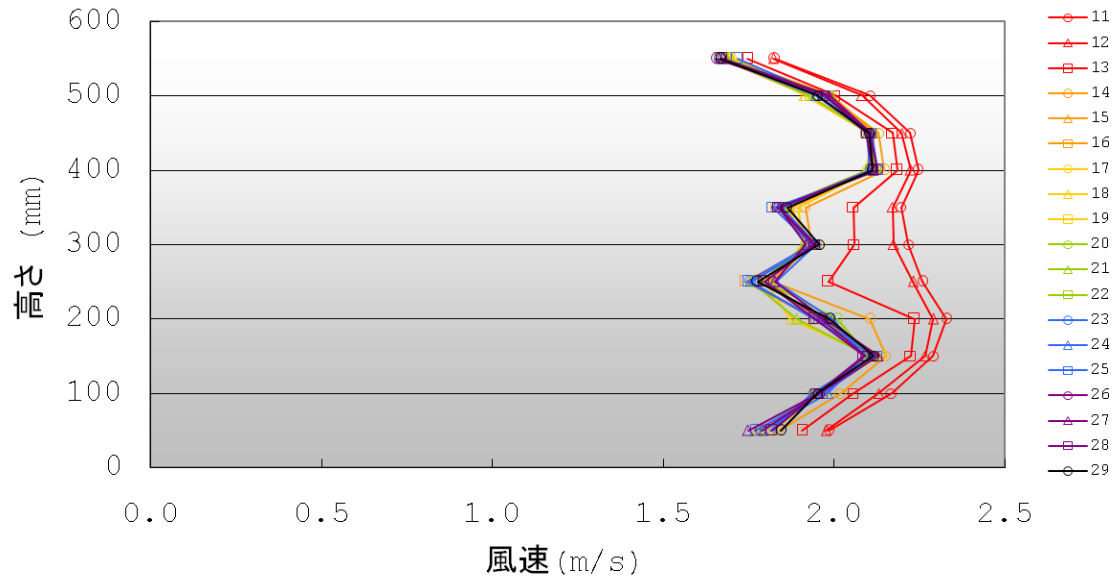


図 4.25 case010b の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

case010b_4v_1000 (風速)

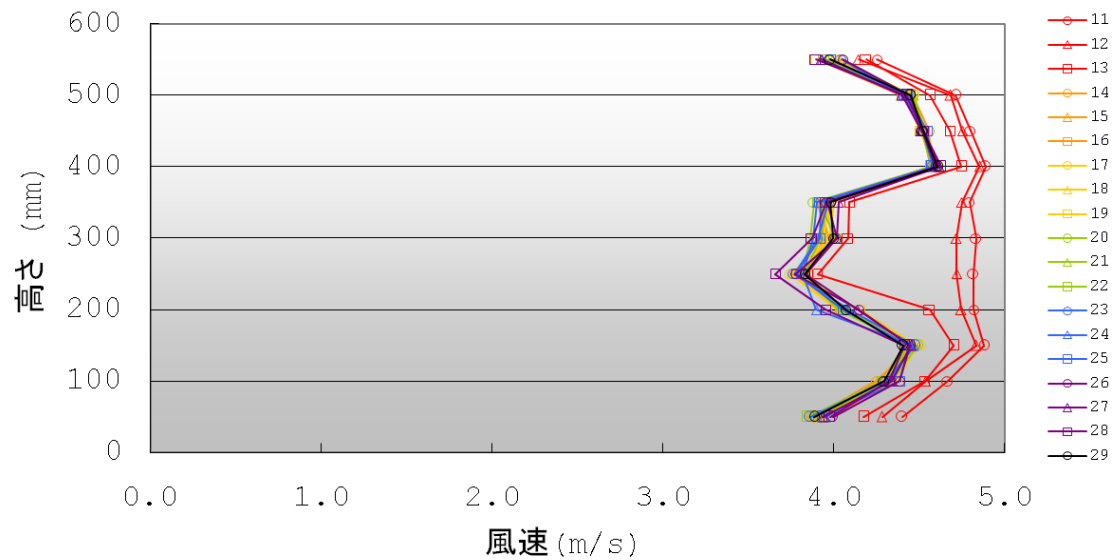


図 4.26 case010b の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

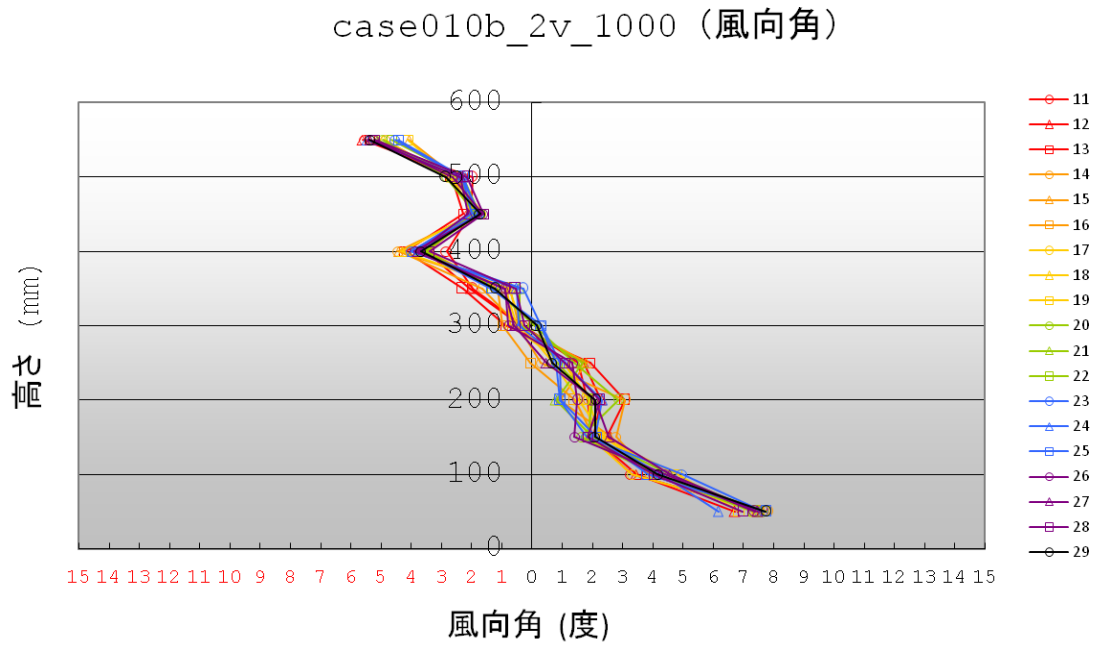


図 4.27 case010b の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

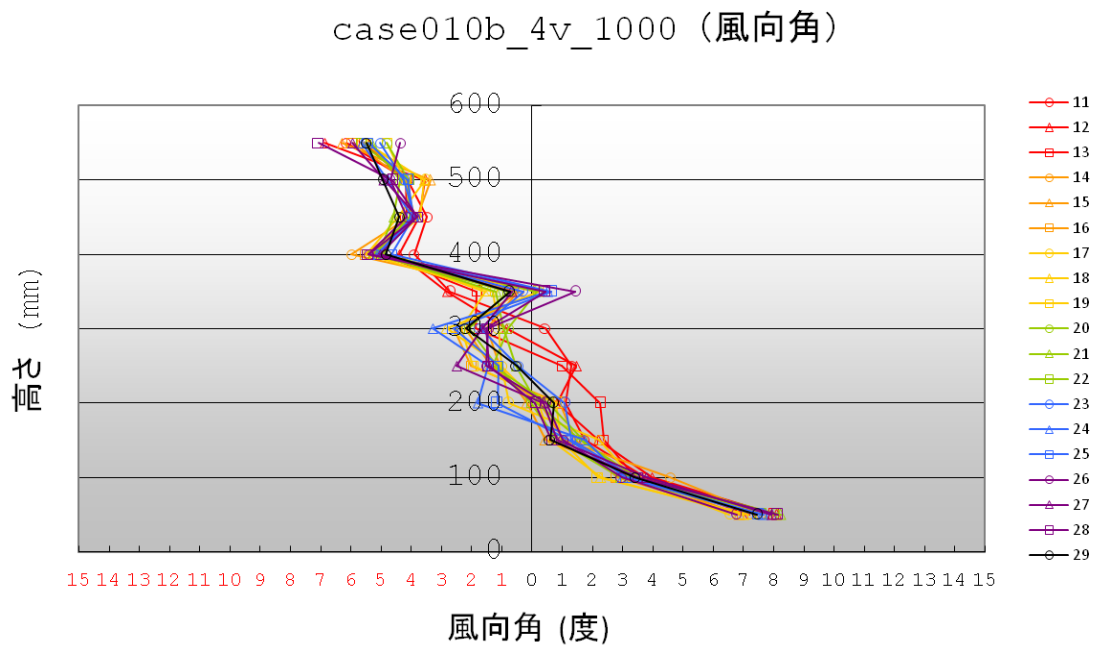


図 4.28 case010b の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

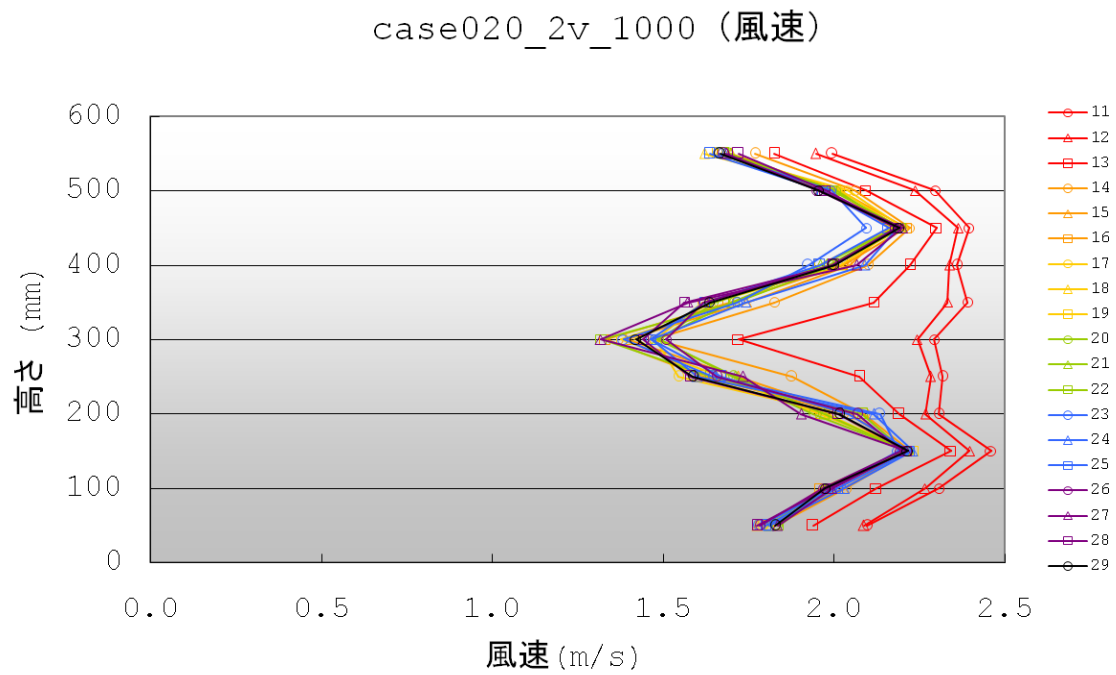


図 4.29 case020 の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

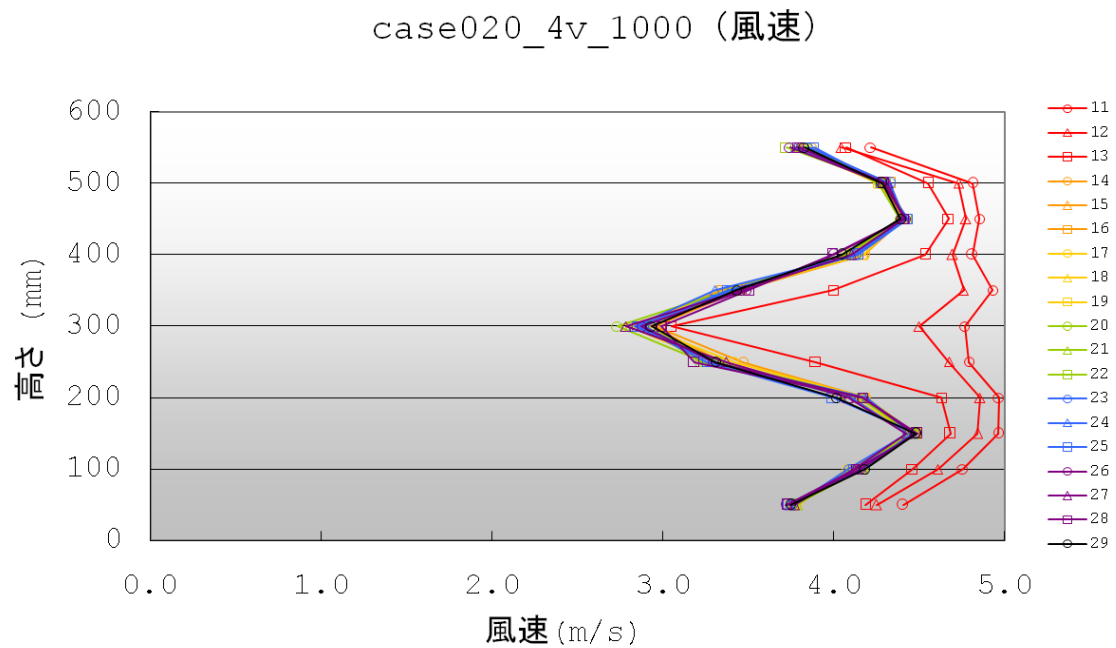


図 4.30 case020 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

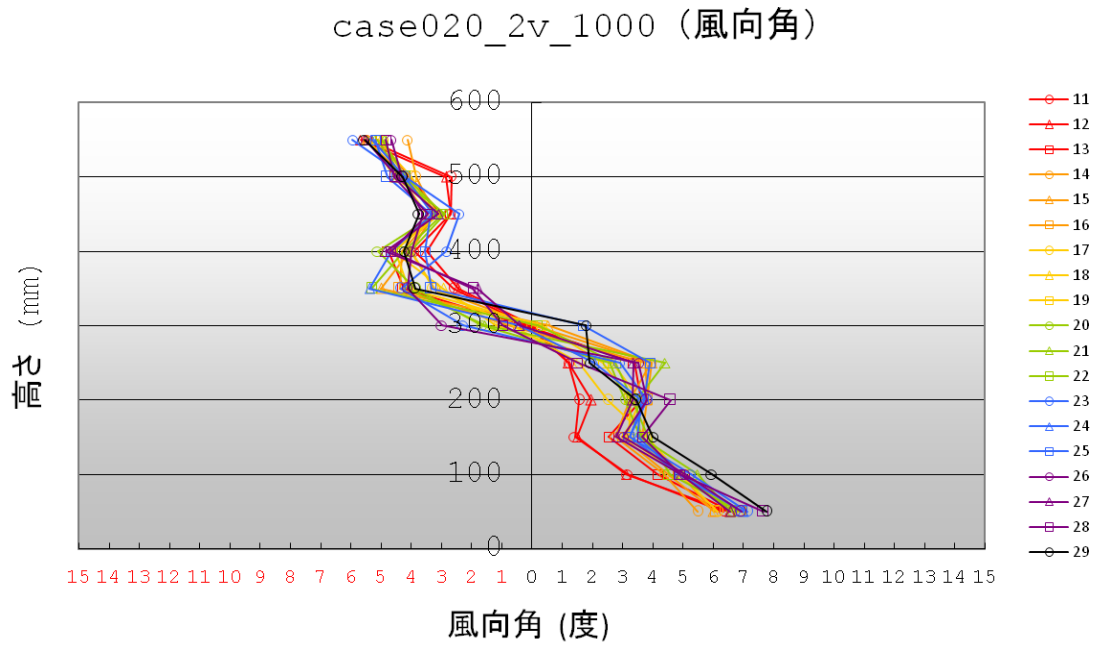


図 4.31 case020 の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

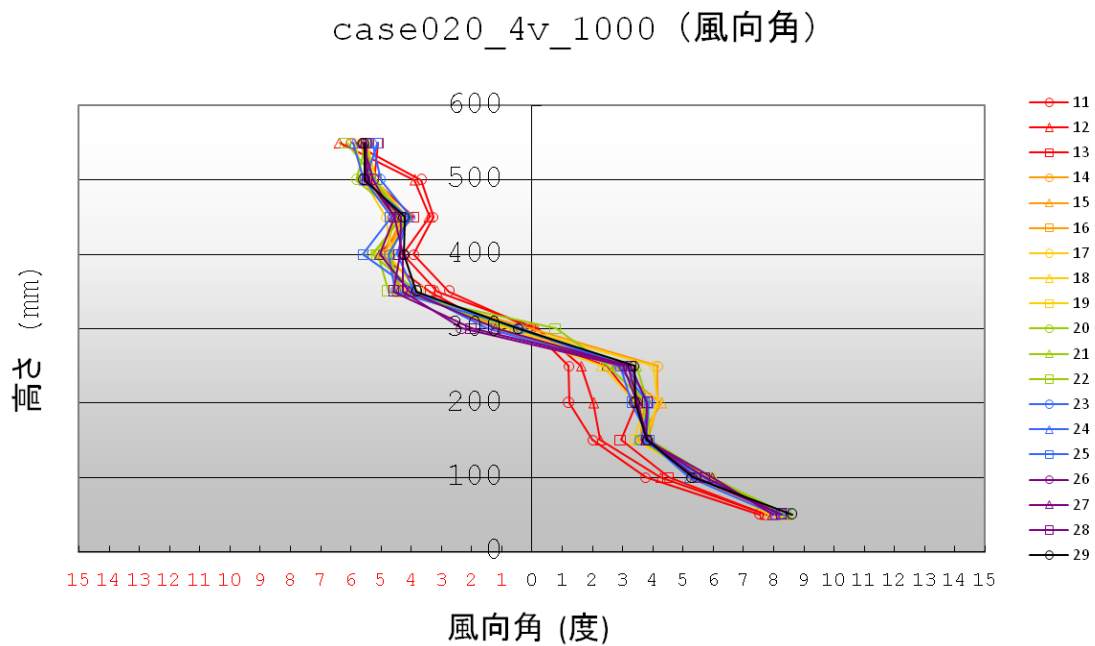


図 4.32 case020 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

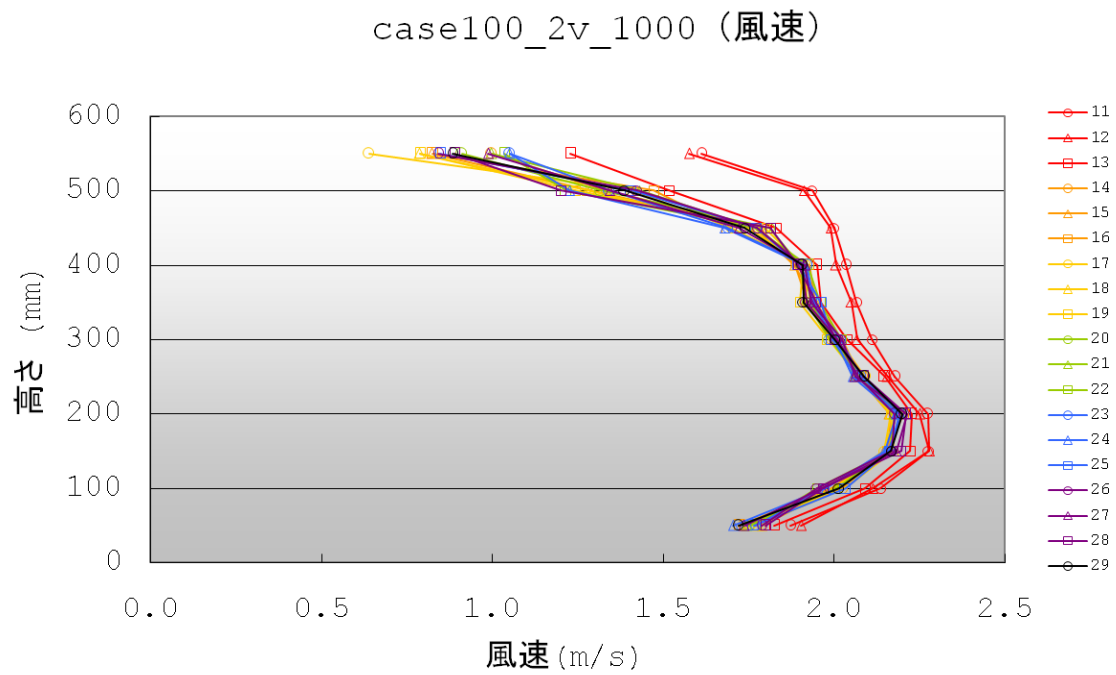


図 4.33 case100 の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

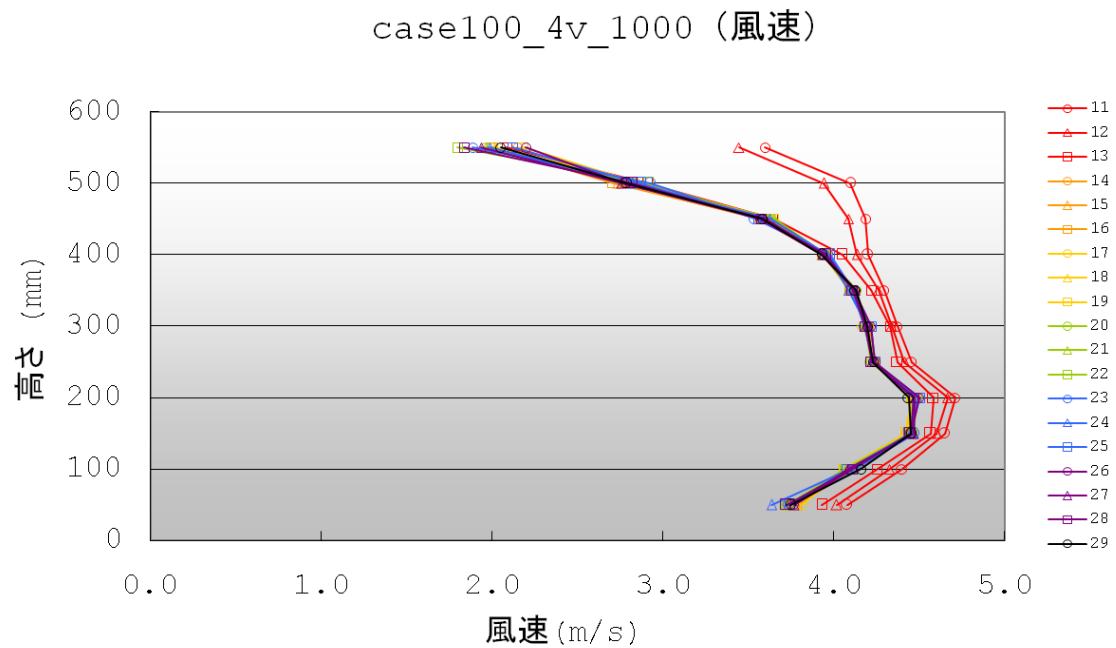


図 4.34 case100 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

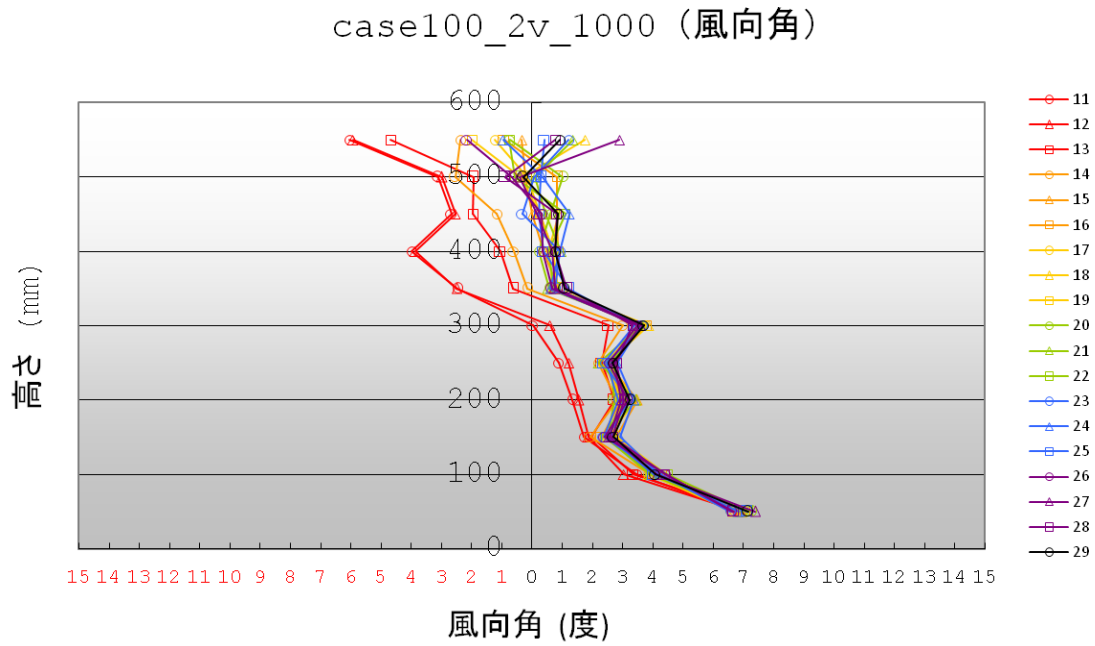


図 4.35 case100 の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

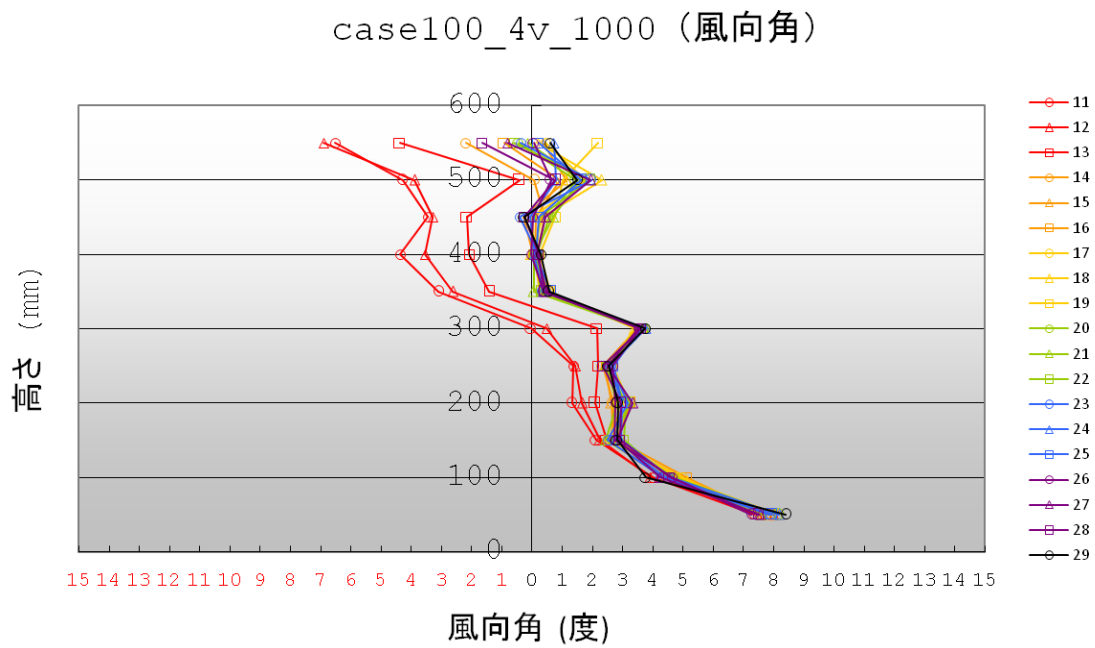


図 4.36 case100 の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

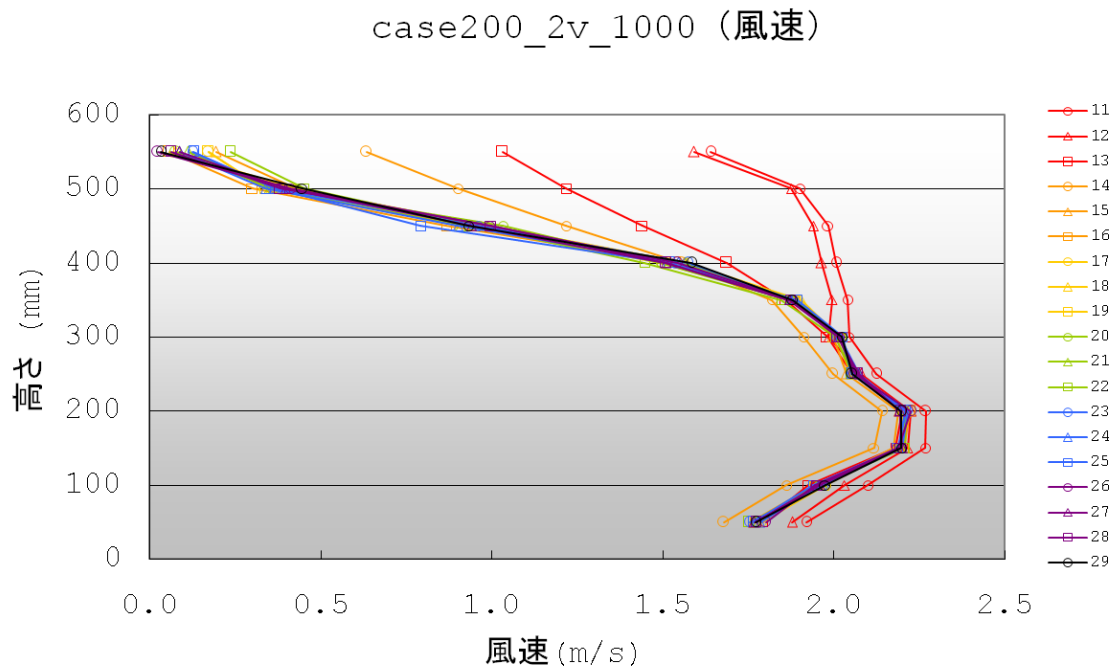


図 4.37 case200 の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

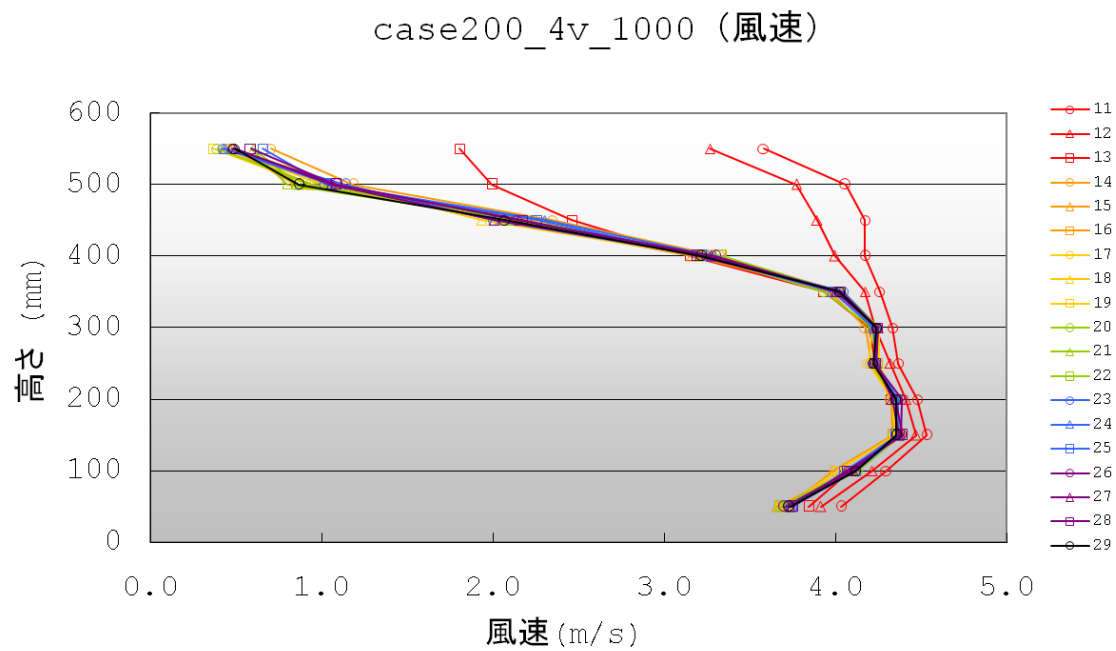


図 4.38 case200 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

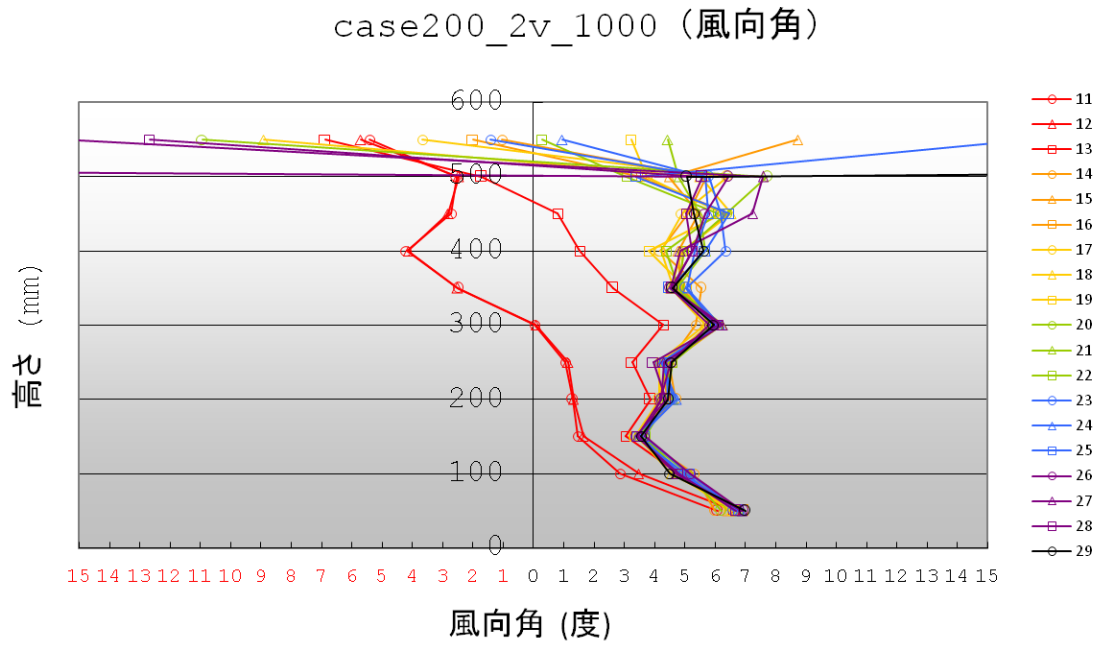


図 4.39 case200 の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

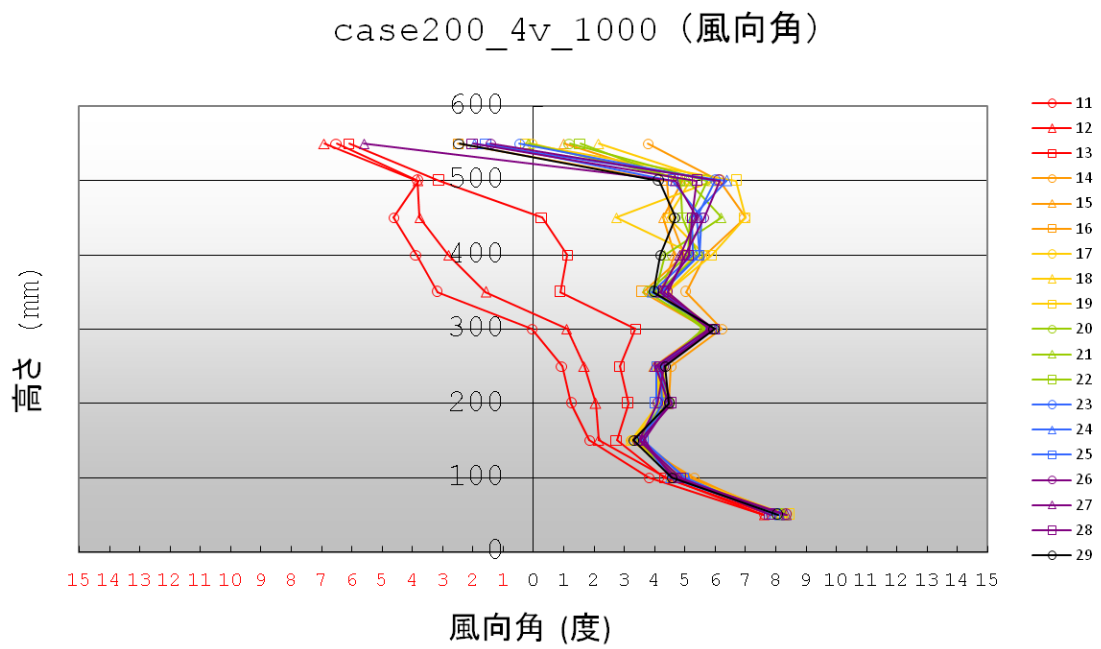


図 4.40 case200 の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

case300_2v_1000 (風速)

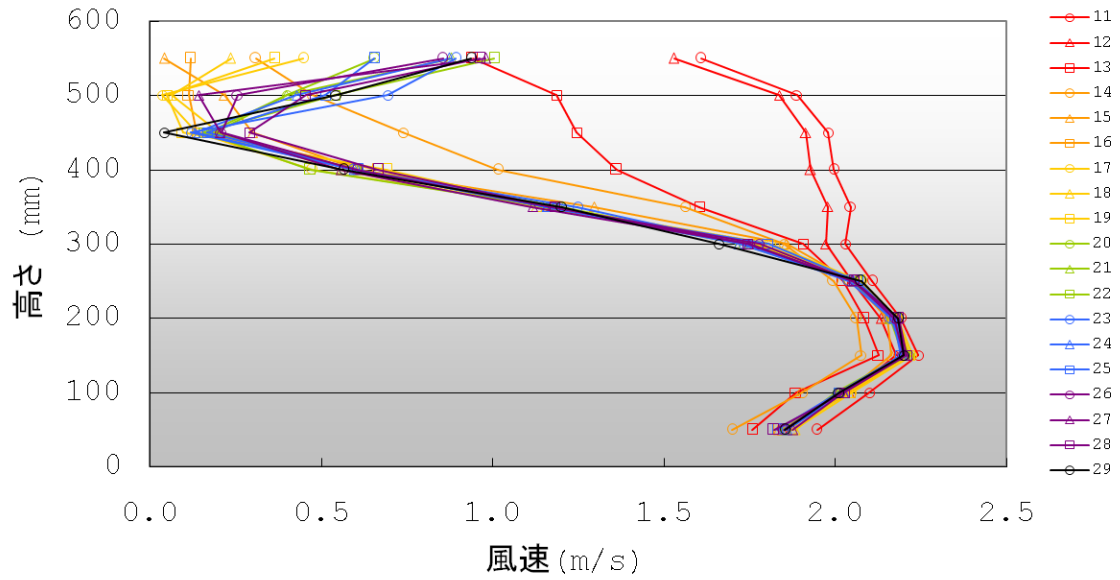


図 4.41 case300 の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

case300_4v_1000 (風速)

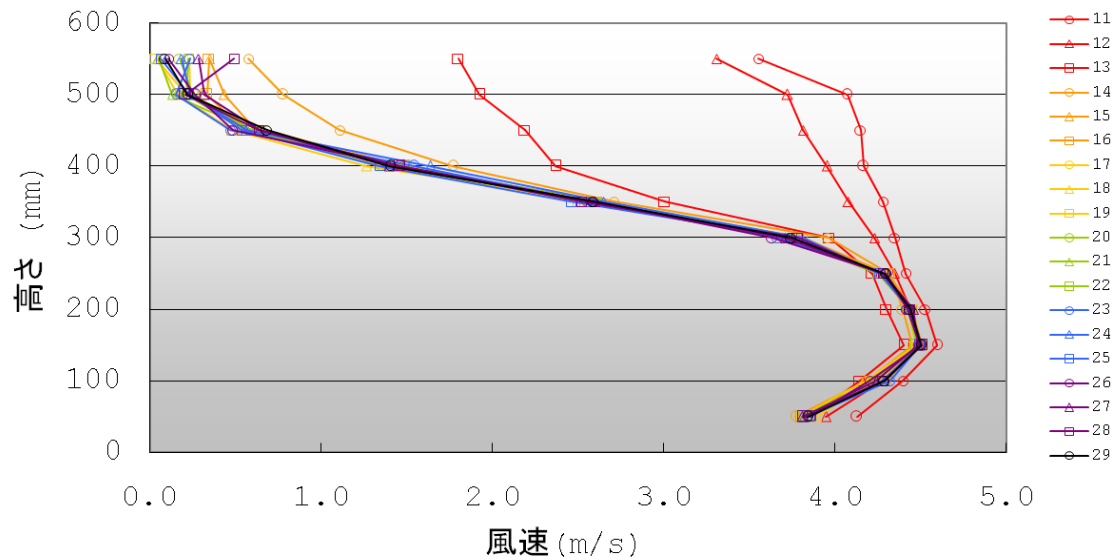


図 4.42 case300 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

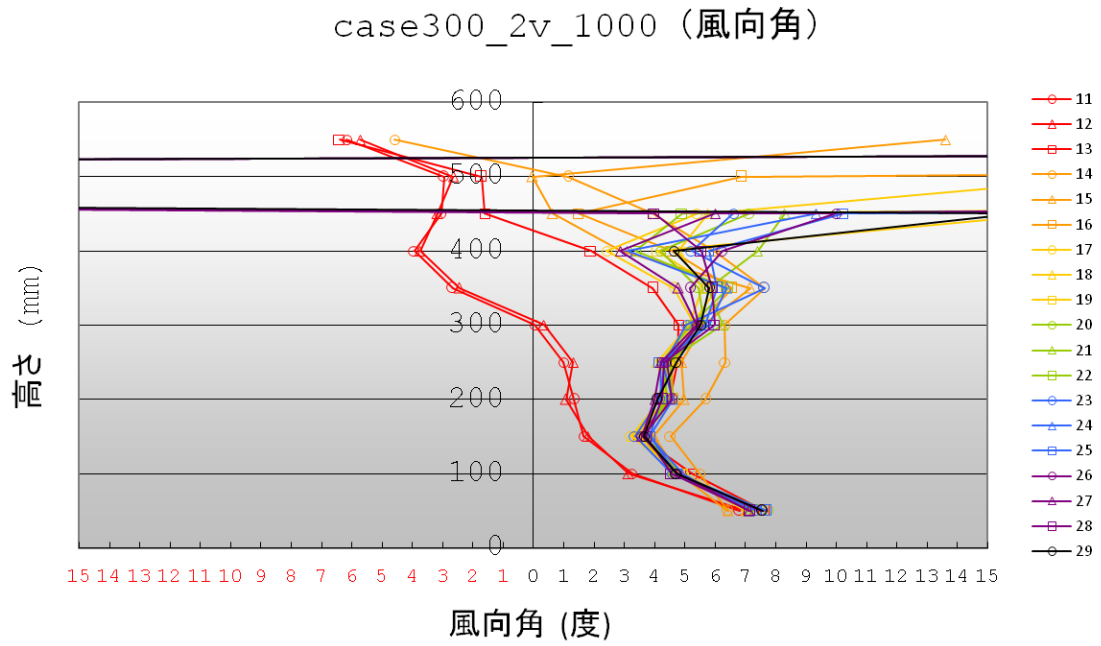


図 4.43 case300 の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

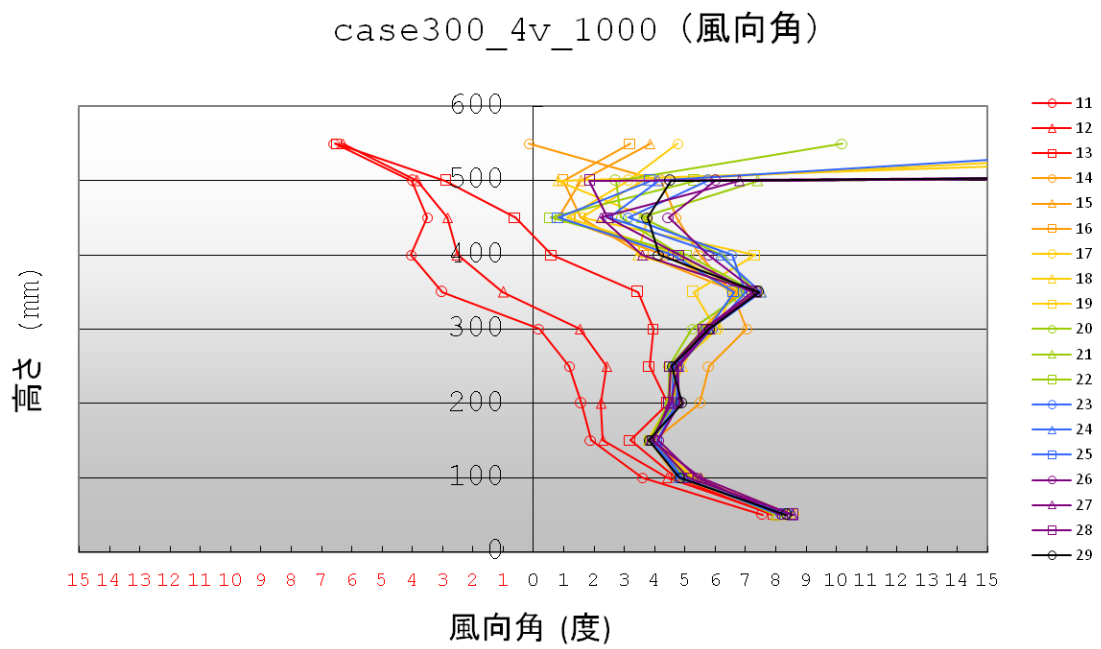


図 4.44 case300 の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

(2) ファンの停止時間を変えた場合

case001_f2_1000 (風速)

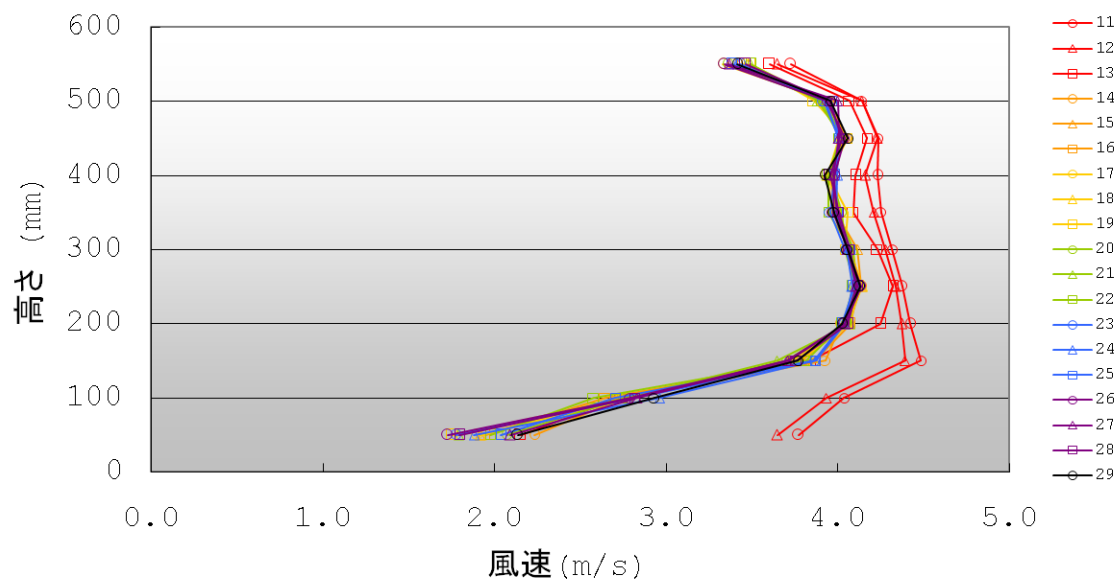


図 4.45 case001_f2 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

case001_f2_1000 (風向角)

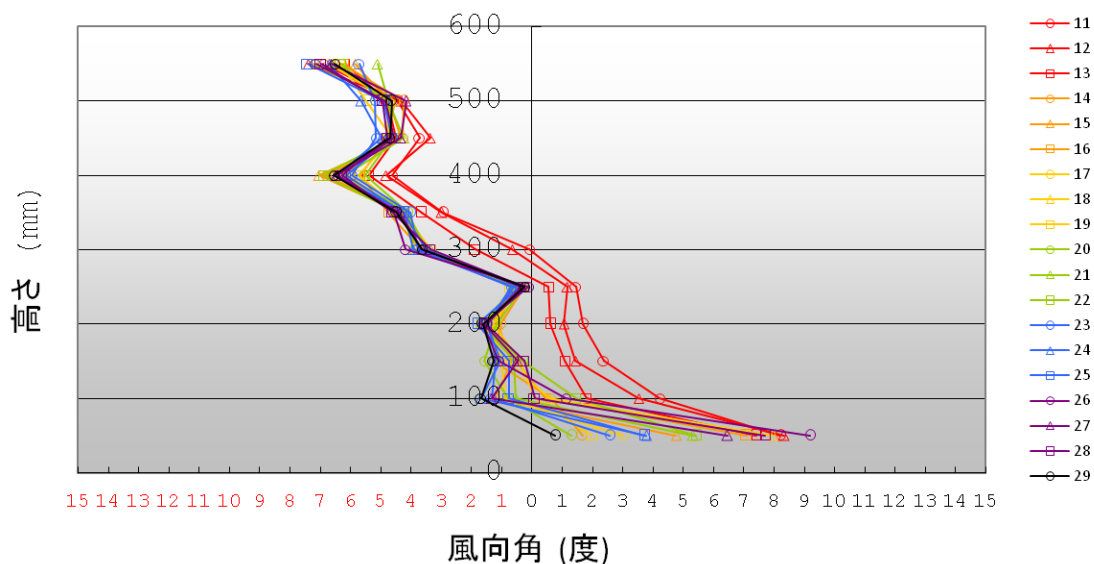


図 4.46 case001_f2 の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

case001_f5_1000 (風速)

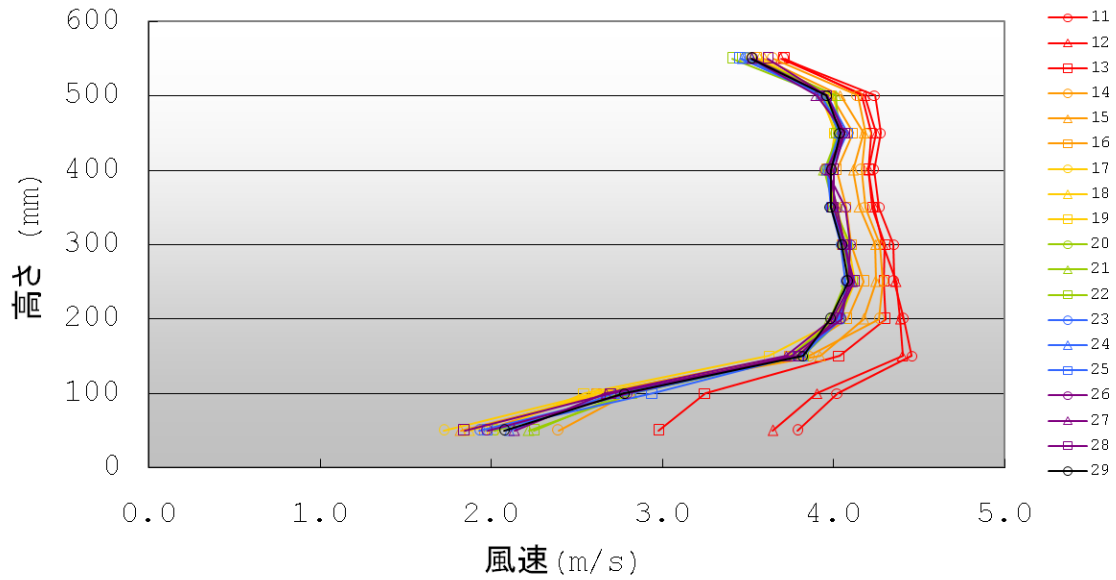


図 4.47 case001_f5 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

case001_f5_1000 (風向角)

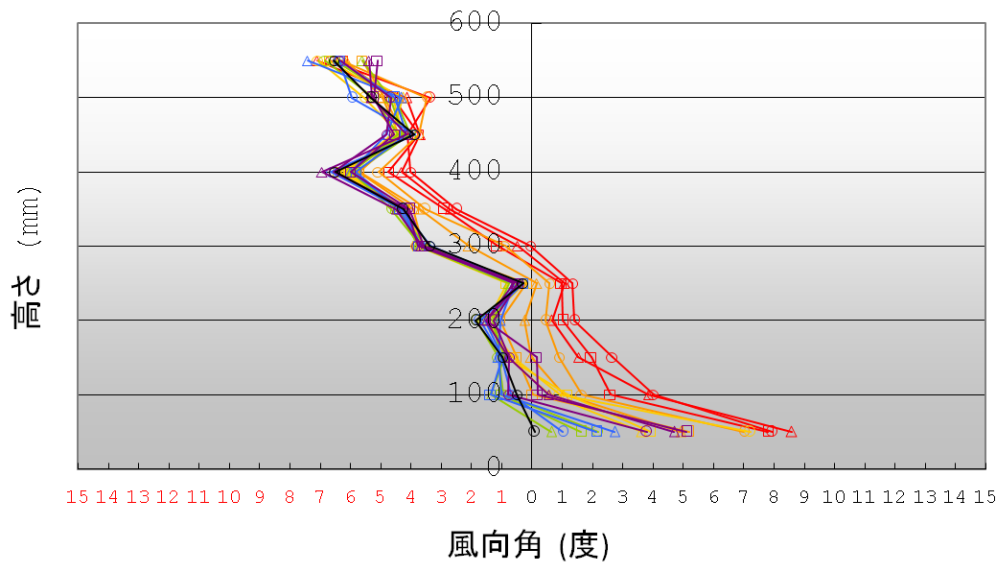


図 4.48 case001_f5 の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

case001_f10_1000 (風速)

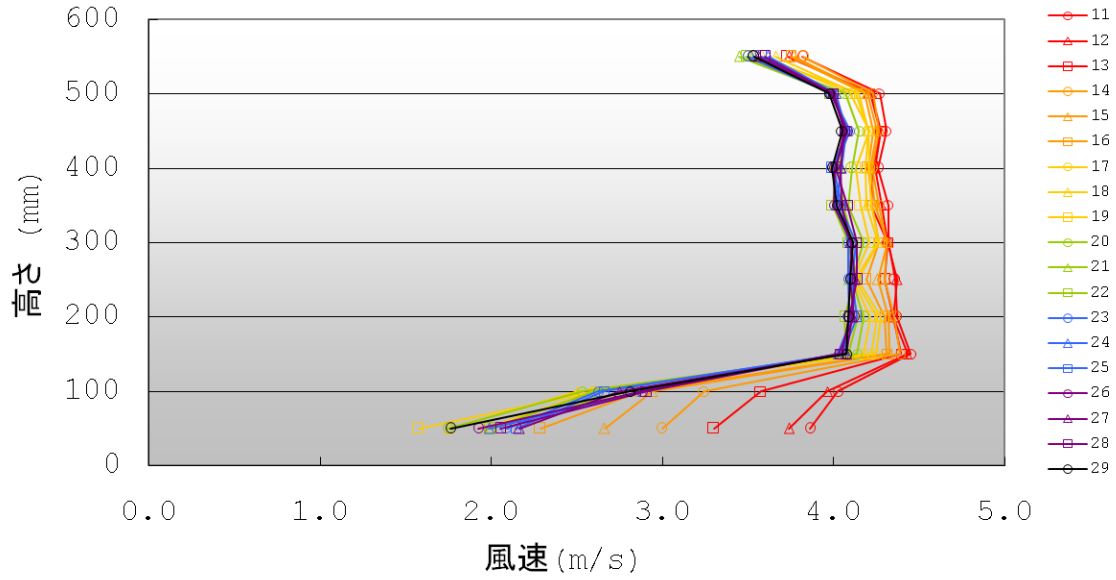


図 4.49 case001_f10 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

case001_f10_1000 (風向角)

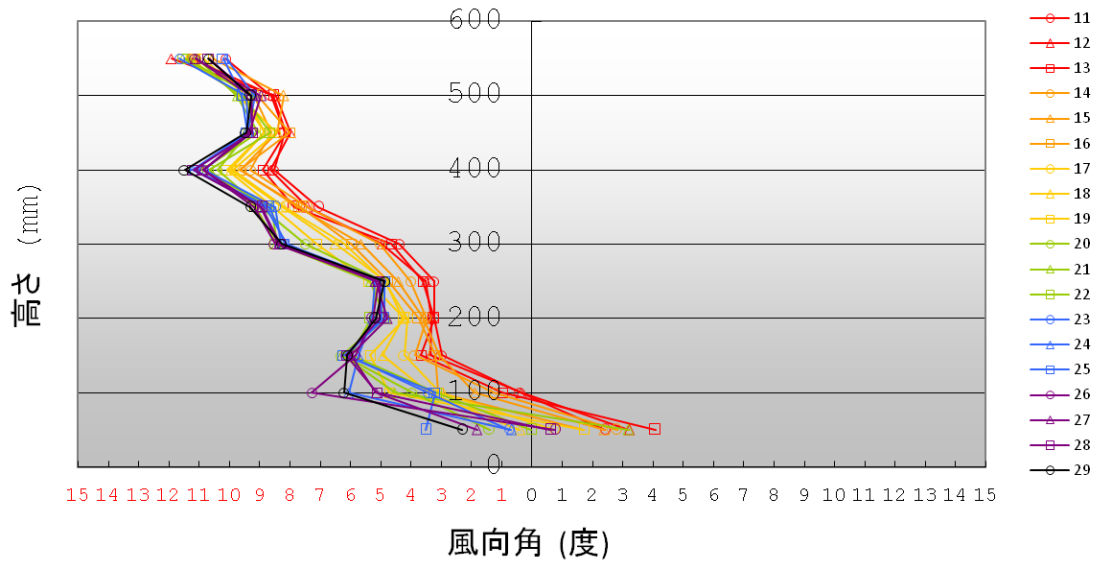


図 4.50 case001_f10 の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

case001_f20_1000 (風速)

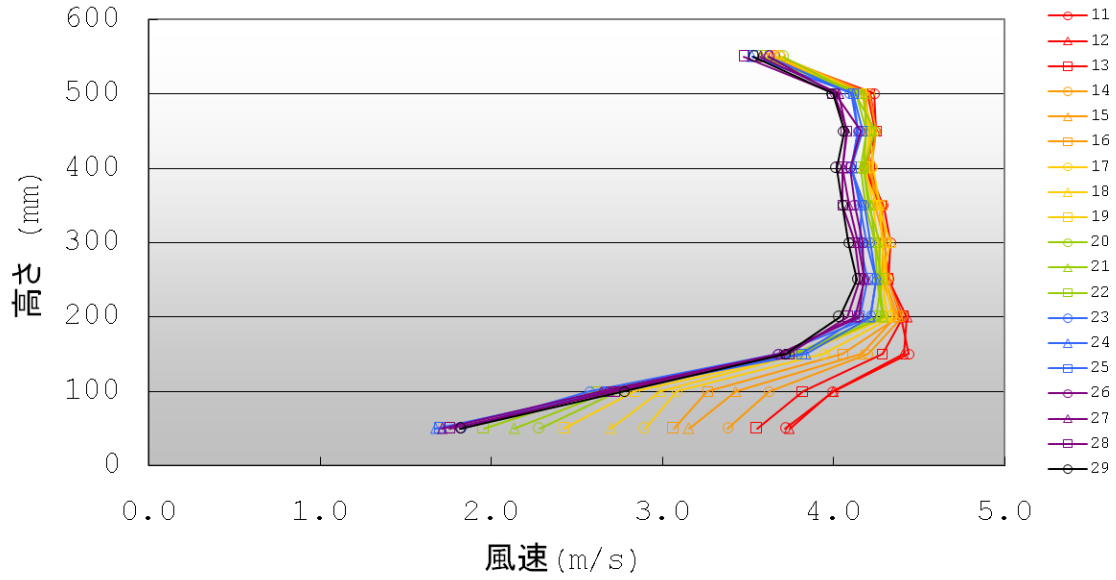


図 4.51 case001_f20 の時間経過による風速変化(入力電圧 4v)

case001_f20_1000 (風向角)

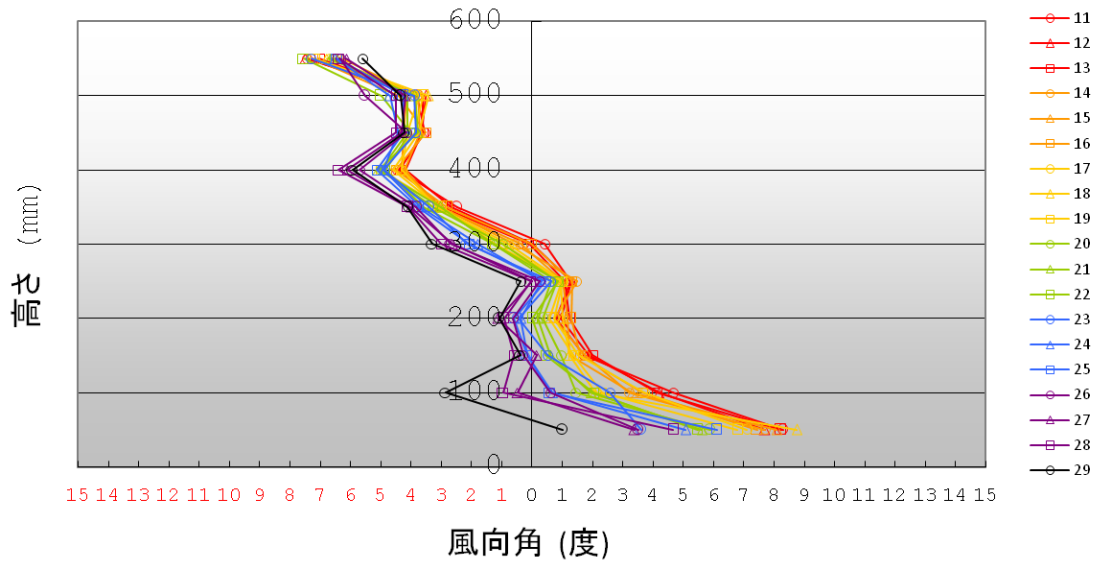


図 4.52 case001_f20 の時間経過による風向変化(入力電圧 4v)

(3) ファンを強めた場合

case010a+_2v_1000 (風速)

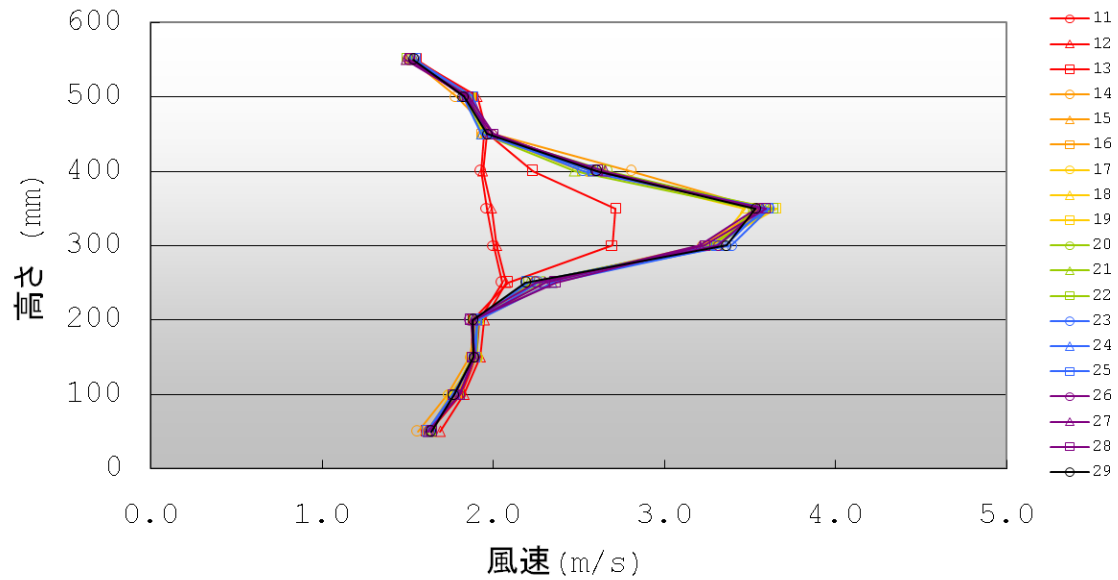


図 4.53 case010a+の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

case010a+_2v_1000 (風向角)

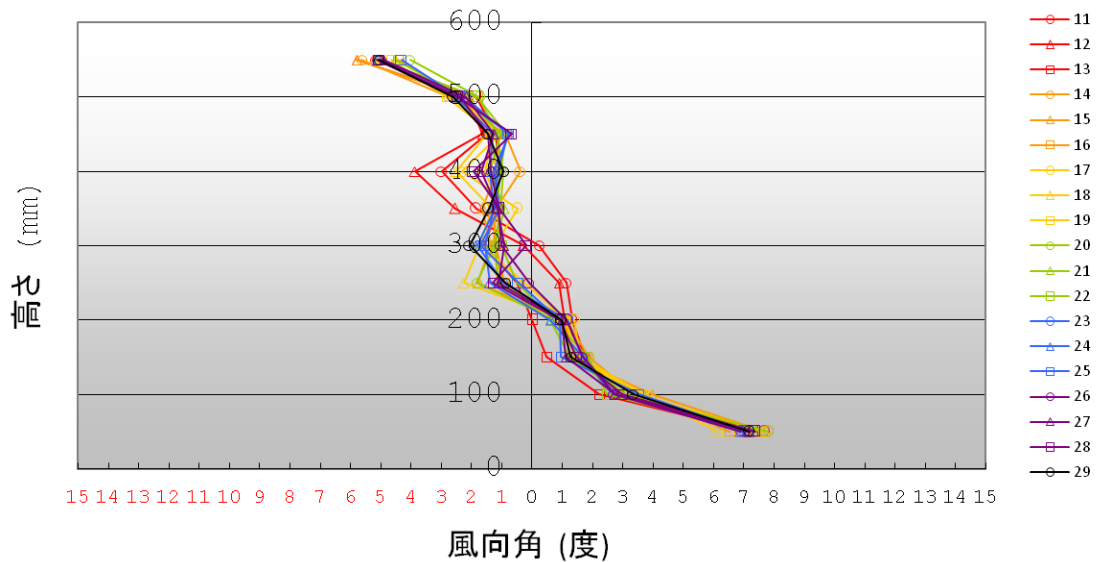


図 4.54 case010a+の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

case010b+_2v_1000 (風速)

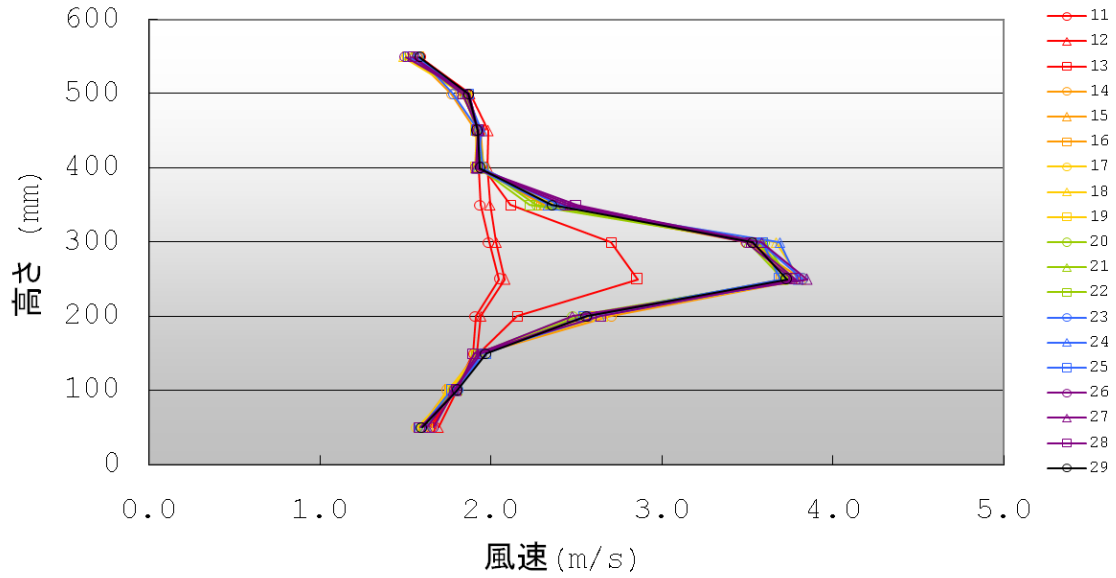


図 4.55 case010b+の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

case010b+_2v_1000 (風向角)

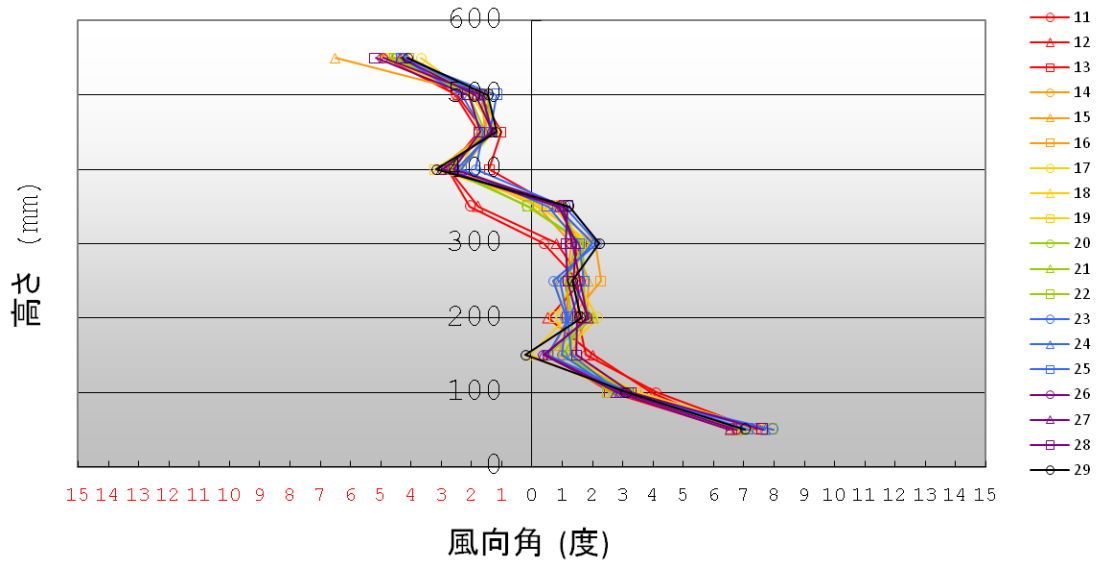


図 4.56 case010b+の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

case020+_2v_1000 (風速)

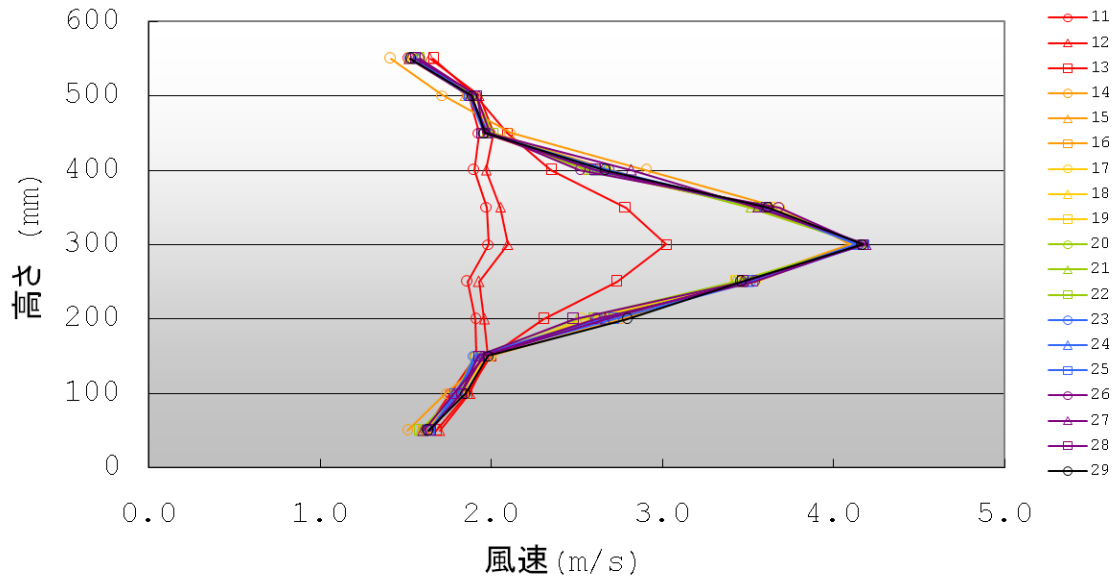


図 4.57 case020+の時間経過による風速変化(入力電圧 2v)

case020+_2v_1000 (風向角)

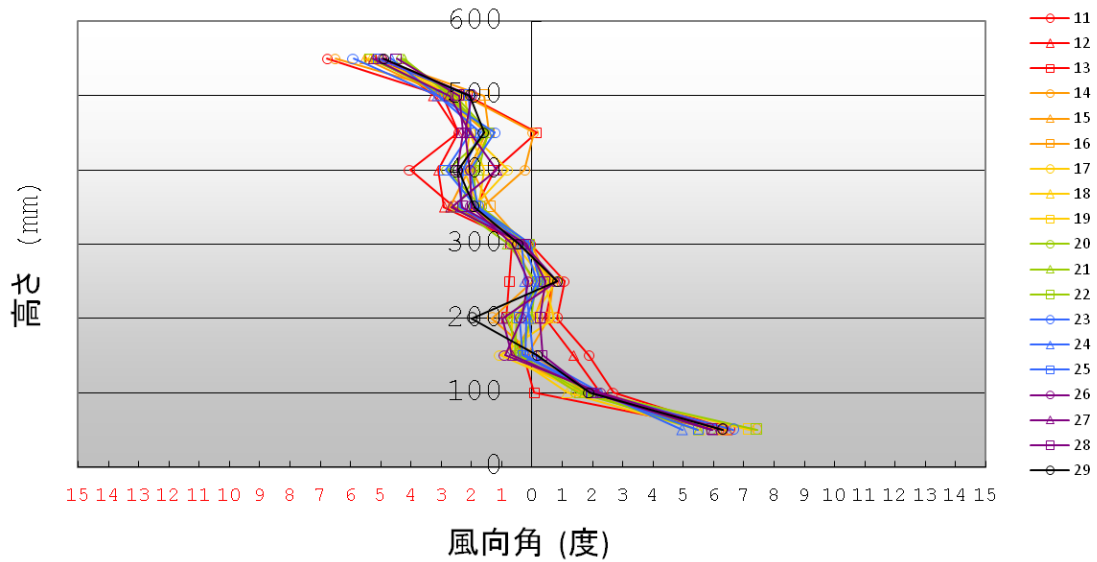


図 4.58 case020+の時間経過による風向変化(入力電圧 2v)

(4) ファンの強弱を組み合わせた場合

case002A_950 (風速)

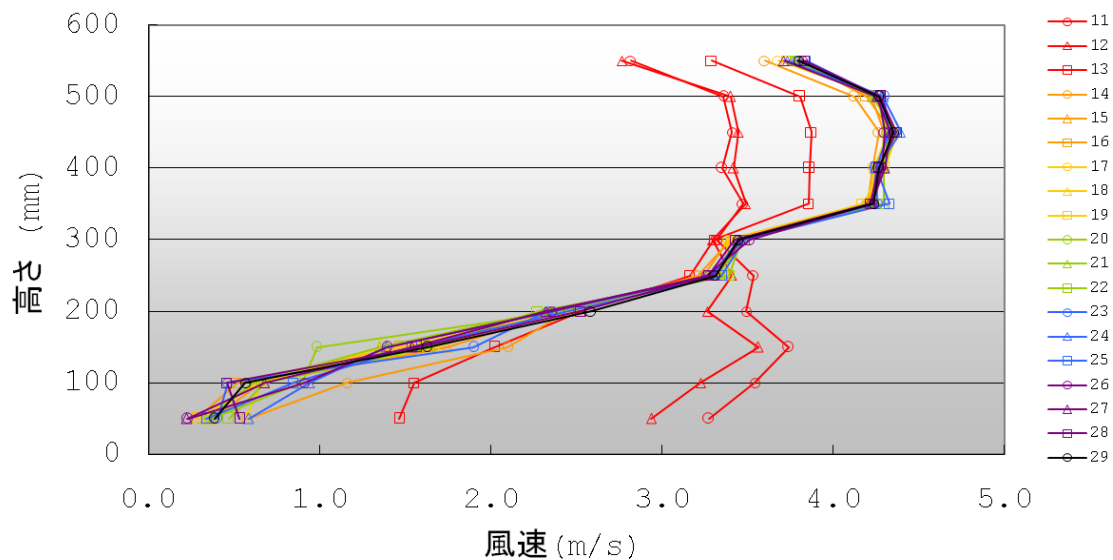


図 4.59 case002A の時間経過による風速変化

case002A_950 (風向角)

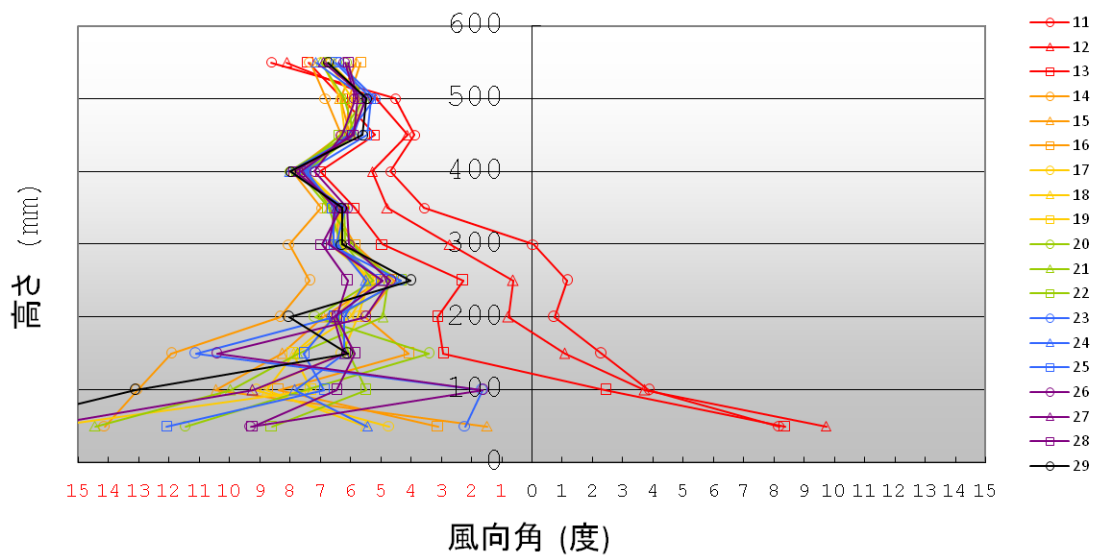


図 4.60 case002A の時間経過による風向変化

case002B_950 (風速)

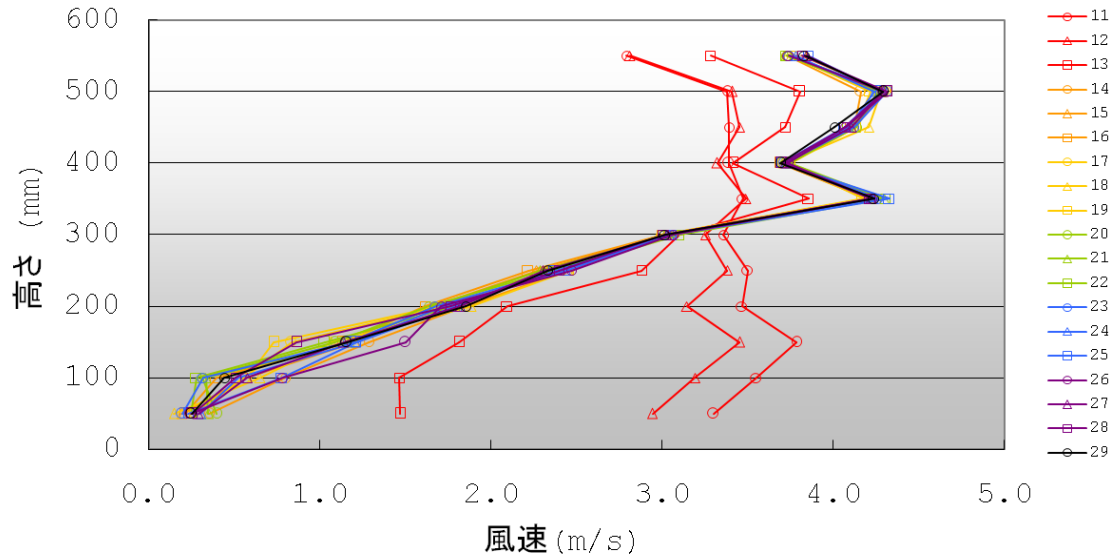


図 4.61 case002B の時間経過による風速変化

case002B_950 (風向角)

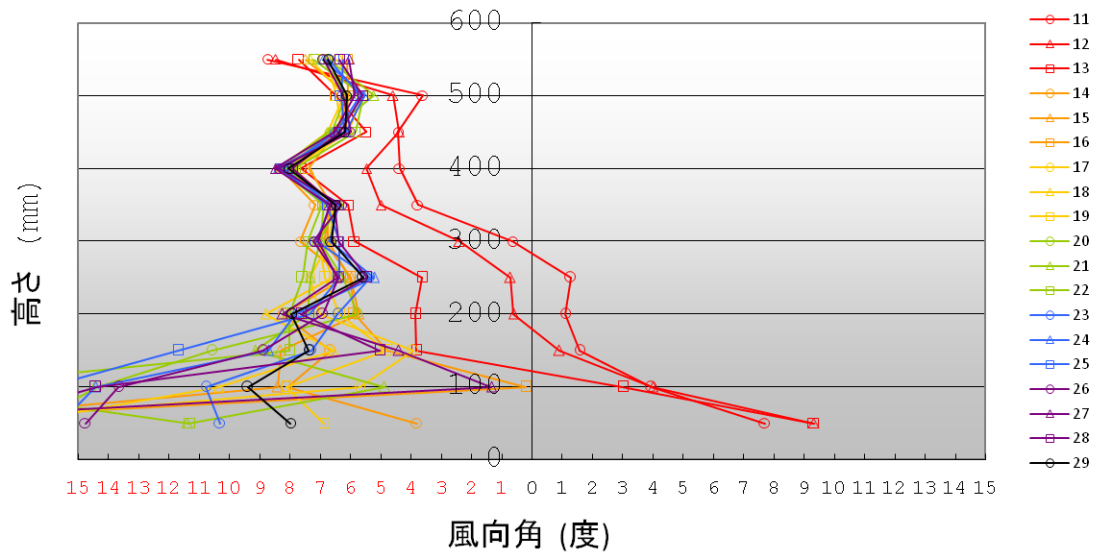


図 4.62 case002B の時間経過による風向変化

4. 4 考察

4. 4. 1 結果の考察

(1) ファンを停止した場合

まずは、風速についての考察を行う。

図 4.63 はファンの下部を停止した case001, case002, case003 の変化後の安定した状態である 29 秒時点に対して変化前の安定した状態である 11 秒時点の風速がどれだけ減少したかを示したものである。ここでは、入力電圧 2v, 4v の違いを明らかにするために、図における入力電圧 4v での風速の値を半分にして表記している。

図 4.64 は、ファンの上部を停止した case100, case200, case300 の変化後の安定した状態である 29 秒時点に対して変化前の安定した状態である 11 秒時点の風速がどれだけ減少したかを示したものである。ここでも同様に、図における入力電圧 4v での風速の値を半分にして表記している。

それぞれの風速及び風向の時刻歴変化は、図 4.9 から図 4.20 及び図 4.33 から図 4.44 を参照していただきたい。

Case001 では、150mm 以上でほぼ一定の風速の減少が見られた。同様に case002 では 300mm 以上で、case003 では 350mm 以上で、高さ方向の風速の減少がほぼ一定になっていることがわかった。

Case001, case100 及び case002, case200 はファンを停止した位置に近付くにつれて風速の減少が小さくなっているのに対し、case003 及び case 300 は少し異なる形状になっている。Case003 では具体的に、150mm から 300mm では case001 等と同様、高さが下がるとその影響が大きくなっているが、0mm から 150mm では高さに従って影響が変化しているわけではない。すなわち、ファンを停止した部分と一定の風速で流れている気流との境界では、ある程度までは一定の気流が流れ込むため、減少が大きくなりにくい、ある高さより下になるとその影響はなくなり、減少は乱れた状態ではあるものの、一定になる。

Case100 では ch6 のみを停止したので、ch1 のみを停止した case001 と対象になることが予想され、結果も予想通りであった。Case200, case 300 も同様に case002, case 003 と対称である様子が確認出来た。

また、入力電圧 2v と 4v では、風速変化は、ファンを停止した部分以外の高さでは完全に相似であることが分かった。

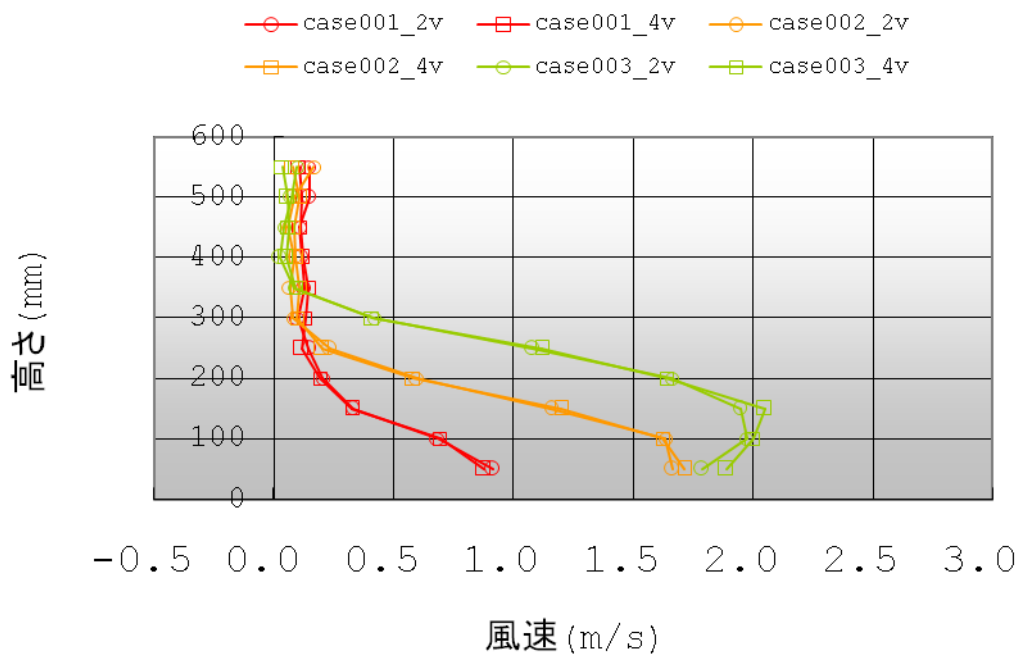


図 4.63 風速の変化(case001, 002, 003)

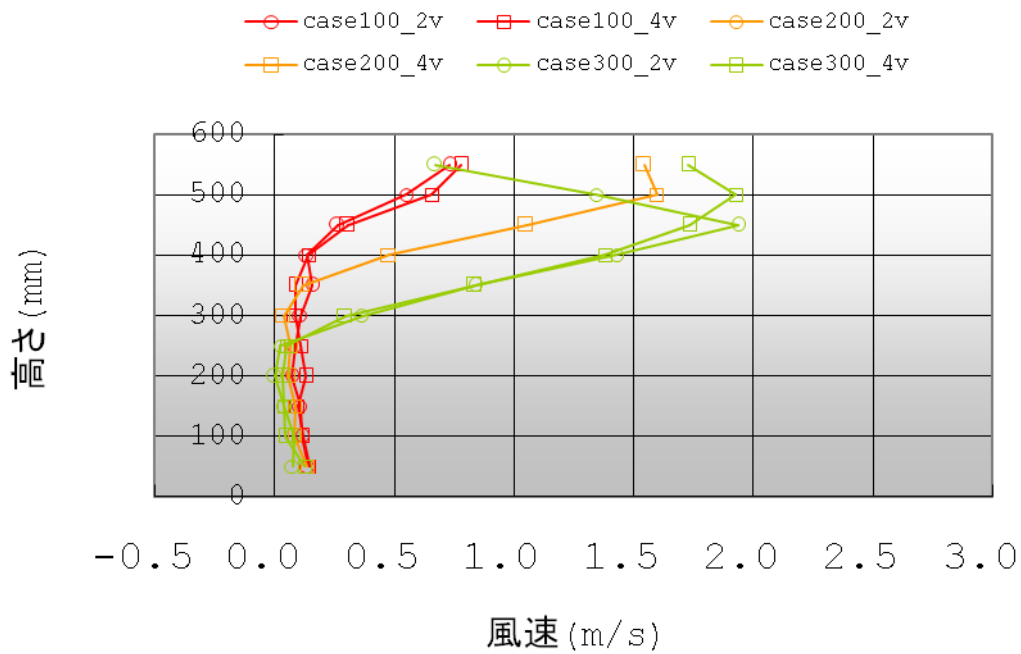


図 4.64 風速の変化(case100, 200, 300)

図 4.65 は、ファンの中心部を停止した case010a, case 010b, case 020 の変化後の安定した状態である 29 秒時点に対して変化前の安定した状態である 11 秒時点の風速がどれだけ減少したかを示したものである。ここでも同様に、図における入力電圧 4v での風速の値を半分にして表記している。

それぞれの風速及び風向の時刻歴変化は、図 4.21 から図 4.32 を参照していただきたい。

case010a と case 010b を見てみると、風速を停止した位置とその上下 50mm に対し大きな風速減少が起きていることが分かった。また、case020 では、ほとんどの減少がファンを停止した部分で起こっていることが分かった。これらの値に着目すると、停止した部分の風速を上下から補うため、風速の減少は case001 等の風洞下部や上部を停止した場合に比べ、半分程度であることが分かった。

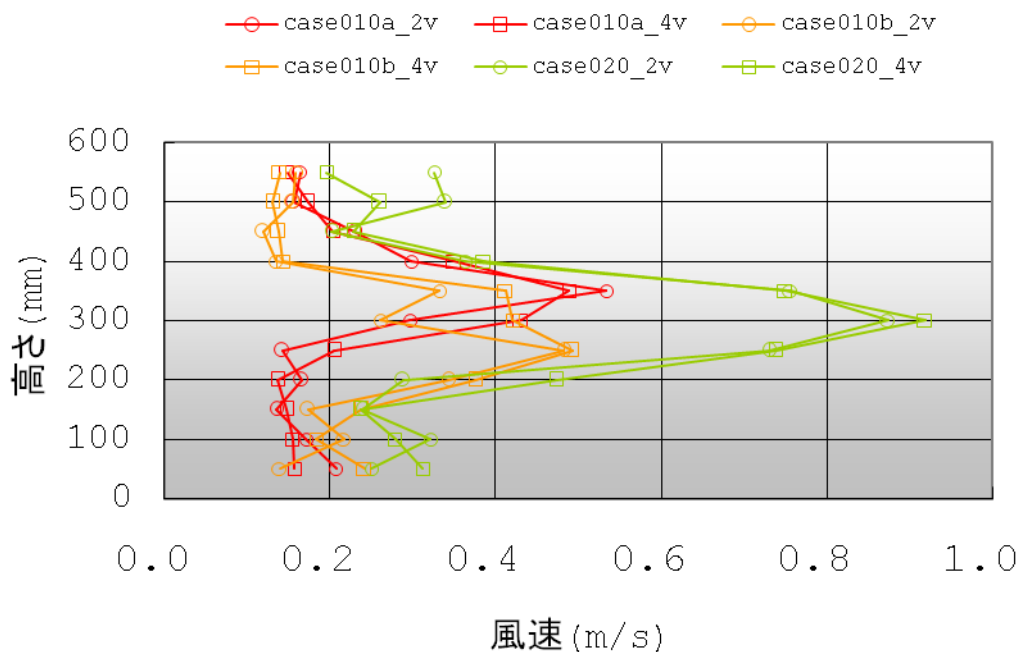


図 4.65 風速の変化(case010a, 010b, 020)

次に、風向についての考察を行う。

図 4.66 は、ファンの下部を停止した case001, case 002, case 003 の変化後の安定した状態である 29 秒時点に対して変化前の安定した状態である 11 秒時点の風向がどれだけ減少したかを示したものである。

図 4.67 は、ファンの上部を停止した case100, case 200, case 300 の変化後の安定した状態である 29 秒時点に対して変化前の安定した状態である 11 秒時点の風向がどれだけ減少したかを示したものである。

それぞれの風速及び風向の時刻歴変化は、図 4.21 から図 4.32 を参照していただきたい。

Case001 では、ファンを停止した上部において、4 度程度の風向変化が確認出来た。Case002 では、6 度程度の風向変化が確認出来た。case003 では、さらに大きな風向変化が起こることが予想されたが、case002 と同程度の 6 度程度であった。この結果から、停止したファンが多いほど、風向変化が大きいわけではないことが分かった。

Case100, case200, case300 は、case001, case002, case003 と対称であることが予想されるが、ファンを停止した少し下部で風向が乱れている様子が確認された。これは、重力の影響で、乱れた気流がファンを停止した部分の少し下部に流れ込んだことが原因である可能性が高い。

例えば、野村らの AC サーボモータ風洞では、風向角を+45 度から-45 度まで変化させることが出来るため、6 度という値は比較的小さな値ではあるが、複数ファンを持つ風洞で風向の変化が起きることがはっきりと確認出来た。

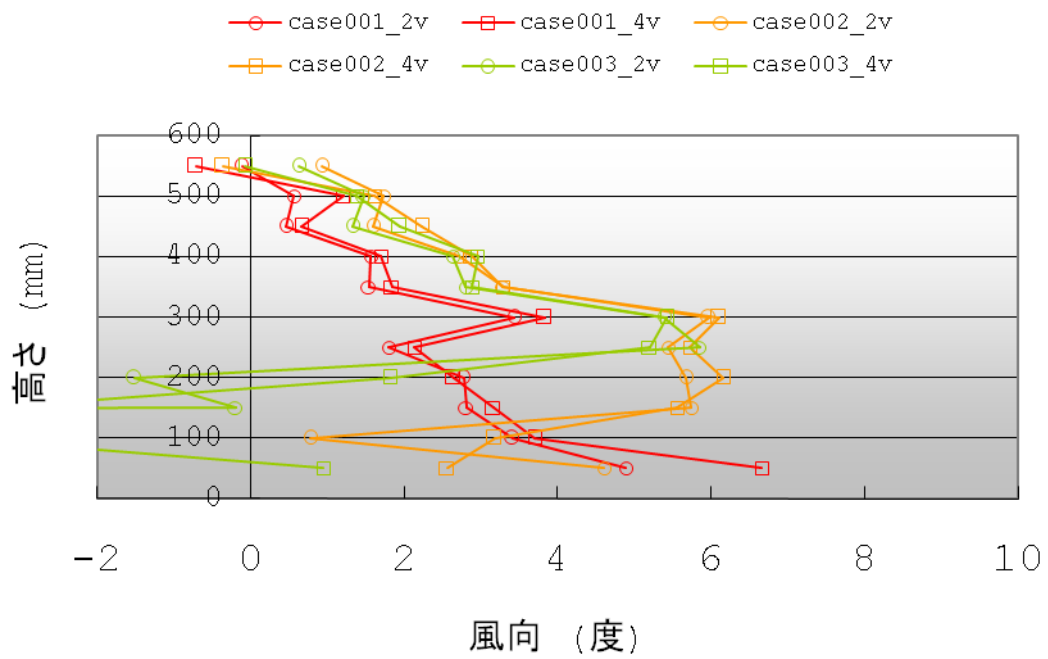


図 4.66 風向の変化(case001, 002, 003)

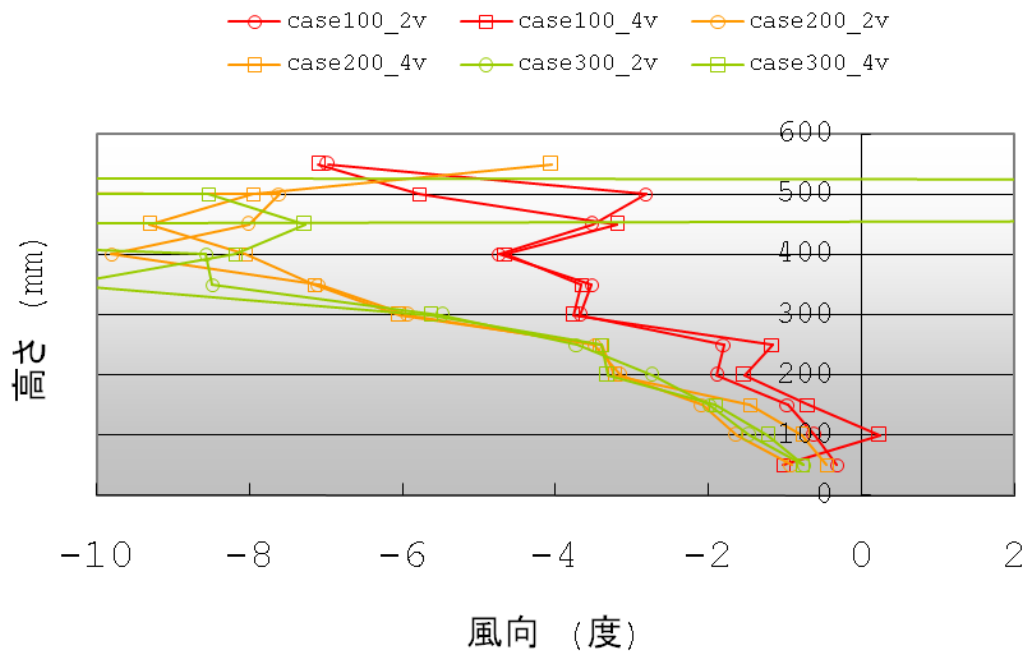


図 4.67 風向の変化(case100, 200, 300)

図 4.68 は case010a, case 010b, case 020 の変化後の安定した状態である 29 秒時点に対して変化前の安定した状態である 11 秒時点の風向がどれだけ減少したかを示したものである。

Case010a, case 010b はファンを停止した上下で 2 度程度の変化が起きているもののその様子は比較的乱れている。Case002 では、ファンを停止した上部で、水平に流れていた気流が下向きに流れ込む様子が確認出来、下部では、ファンを停止した下部で水平に流れていた気流が上向きに流れ込む気流が確認出来た。

このように中心部のファンの回転数を減少させれば、ファンを停止した位置の上下に位置する水平に流れていた気流が、ファンを停止した位置に流れ込む様子を確認出来た。また、ファンを停止することによって風速が減少することに対し、ファンを停止した位置の上下から、停止した部分に流れ込むことが出来るため、case001 や case002 に対し、その変化は、半分程度であることが分かった。

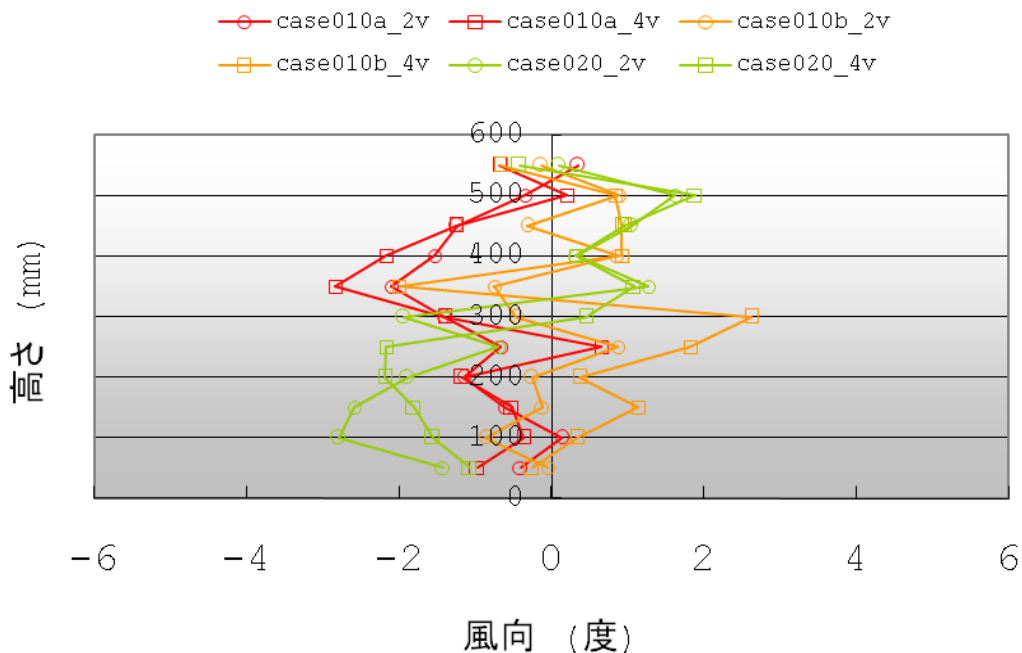


図 4.68 風向の変化(case010a, 010b, 020)