

2010 年度 修 士 論 文

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

Fundamental Study on Non-Stationary Effects on Buildings under Strong Winds with Direction Change

寺井 亮

Terai, Ryo

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
1.1.1. 研究背景	p.2
1.1.2. 目的	p.3
1.2. 1列複数ファン風洞における既往研究	p.4
1.3. 本論の構成	p.6
2. 3列複数ファン風洞の概要と基本性能	p.7
2.1. 本章の概要	p.8
2.2. 風洞設備の概要	p.9
2.2.1. 3列複数ファン風洞	p.9
2.2.2. 測定制御システム	p.13
2.2.3. 風速測定方法	p.14
2.3. 3列複数ファン風洞の基本的特性	p.15
2.3.1. 風洞内の気流分布の確認	p.15
2.3.2. 入力電圧と風速の関係	p.19
2.3.3. 1列複数ファン風洞との比較	p.25
3. 非定常に風向変化する気流データの作成	p.29
3.1. 本章の概要	p.30
3.2. 作成目標とする気流性状と実験要件	p.31
3.2.1. 1列複数ファン風洞における実験	p.31
3.2.2. 実験手順	p.32
3.3. 上下端のファンに対する入力値の調整	p.33
3.3.1. 測定方法に基づく検討事項	p.33
3.3.2. 上下端のファンへの入力値の検討	p.36
3.4. 中央4段のファンに対する入力値の調整	p.39
3.4.1. おおまかな検討	p.39
3.4.2. 各ケースの微調整	p.47
3.5. 非定常風向変化気流の作成	p.52
3.5.1. 作成にあたっての基本事項	p.52
3.5.2. 測定結果	p.53

4. 風洞内静圧分布の測定実験	p.61
4.1. 本章の概要	p.62
4.2. 静圧測定手法	p.63
4.2.1. 圧力測定機器の概要	p.63
4.2.2. 風洞内静圧の測定方法	p.64
4.3. 風速変化時における風洞内静圧分布	p.65
4.3.1. 風洞内の静圧分布の確認	p.65
4.3.2. 結果の考察	p.78
4.4. 風向変化時における風洞内静圧分布	p.84
4.4.1. 特定面内における静圧分布の確認	p.84
4.4.2. 結果の考察	p.91
5. 2次元模型の表面圧力測定実験	p.93
5.1. 本章の概要	p.94
5.2. 圧力測定実験の概要	p.95
5.2.1. 2次元模型と模型の設置位置	p.95
5.2.2. 各種係数の計算	p.98
5.3. 定常状態の下での模型表面風圧力	p.100
5.3.1. 実験内容	p.100
5.3.2. 円柱模型の風圧分布	p.101
5.3.3. 角柱模型の風圧分布	p.107
5.4. 非定常な風向変化の下での圧力の変化	p.113
5.4.1. 実験内容	p.113
5.4.2. 角柱模型における測定結果	p.114
6. 総括	p.121
6.1. 結論	p.122
6.2. 今後の展望	p.124
参考文献	p.125

付録

梗概

謝辞

-第 1 章-
序論

1.1 はじめに

1.1.1 研究背景

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、広く世界に用いられるようになった。その実験結果は、おおむね信頼出来る値として今日の耐風設計・建築環境設計分野に大きく貢献をしてきた訳であるが、実験で再現が難しい非定常な風向変動に関しては、実験結果を元にその要因を可能性として指摘されているが^{*1-1}、その影響について具体的に検討した研究例は極めて少ない。

風向変動を考慮に入れた研究として、池内等^{*1-2}は従来の境界層風洞を用い、風洞内で模型を一定方向に回転させる事で自然風の特徴の一つである瞬間的な風向変動を捉えようと試みている。しかし、池内等の研究は模型を回転させる事で瞬間的な風向変動を再現させている為に、実験条件として多くの仮定条件を想定している。また、別の研究として測定部から放射状に風の流出経路と流入経路を設置する手法^{*1-3}等が挙げられるが、こちらもやはり風速の発生条件に様々な仮定条件が必要であり、必ずしも自然風を模擬して実験が行えたとは言い難い。

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。西等^{*1-4}の先駆的なアクティブ制御型のマルチファン型風洞は、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、西等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。

その為筆者等は、複数のファンを風洞内に1列に設置した2次元風洞の試作的研究^{*1-5,1-6}を元に、非定常な風向変動及び、長周期で非定常な風向変動の作成^{*1-7,1-8,1-9}に成果を上げている。しかし、研究成果として新たな風洞の可能性を示したものの、風洞規模の制限から、測定個所については限定的な測定しか行えない、壁面から発達した境界層が風洞中心部の風速測定点まで影響を及ぼす等、風洞規模によって成果は限定的なものにとどまっている。1列配置の風洞における模型形状の限界や、目標とする非定常気流の再現範囲の制約は明らかである。

そこで、より広範な実験パラメータの設定を想定して、平成22年7月に、1列複数ファン試作風洞の3列配置への拡大を行った。

1.1.2 研究目的

本研究は、平成 22 年度に科学研究費補助金に申請した、「複数ファン制御乱流風洞の高性能化研究」によって設置された、3 列複数ファン風洞を利用する。「複数ファン制御乱流風洞の高性能化研究」における研究目的は表 1.1 のようにまとめられている。

表 1.1 「複数ファン制御乱流風洞の高性能化研究」における研究目的

3 列複数ファン風洞における自然風の模擬	1-1) 3 列複数ファン風洞の基礎的性質に関する研究 1-2) 3 列複数ファン風洞を用いた乱流風洞におけるコヒーレンスの模擬に関する研究 1-3) 数値流体解析による制御パターンの検討
非定常な 3 次元的風向変動の再現と考察	2-1) 3 列複数ファン風洞を用いた非定常な風向変動を持つ気流の作成に関する研究 2-2) 3 列複数ファン風洞を用いた非定常で長周期な乱れを持つ気流が建物風圧特性に与える影響に関する研究 2-3) 数値流体解析による非定常性の検証
非定常風の知見に基づいた新たな実験手法の確立	3) 3 列複数ファン風洞を用いた 3 次元的気流制御による非定常性の風圧分布特性に及ぼす影響に関する研究

このなかで、今回の研究では非定常風向変化の影響を明らかにするために、特に平均的成分に着目することによる、

- 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 次元的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

を目的とする。

1 列複数ファン風洞における既往研究において、ファンを独立制御することにより、風洞内に風向変動をはじめとする非定常気流を作成する事に成功している^{*1-8}。また、非定常で数秒程度の風向変動が建物風圧特性に与える影響についての研究成果を示している^{*1-9}。これらの研究手法を参考にして実験を行い、かつ結果を比較することで、3 列複数ファン風洞における実験の有効性を示す。

1.2 1列複数ファン風洞における既往研究

ここでは、1列複数ファン風洞では行われた既往研究について述べておく。

(a) 「複数ファン風洞を用いた乱流風洞における模擬気流の作成」(1996)^{*1-6}

喜々津によって行われたこの研究により、1列複数ファン風洞は製作された。

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持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地として、ベキ指数 α よりも、パワースペクトルは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、複数ファンの回転制御によって、主流方向に関して比較的低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できる手法の提案である。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総監が減少する性状を持つ気流が模擬でき、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見られ、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。

(b) 「複数ファン風洞による風向変動を持つ気流の作成」(2007)^{*1-7}

外村によるこの研究は、アクティブ制御乱流風洞として製作された1列複数ファン風洞について、さらなる可能性を示すものである。

自然の風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、従来の境界層風洞では1つのファンから吹かせた気流を長い距離吹送させ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は困難であり、風向変動をつくり出すことは難しい。近年では風向変動をつくり出すことに念頭を置いた風洞がいくつか試作されているが、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化実験は前例がない。

そのため、複数ファン風洞においてどの程度の風向変化が可能かを明らかにすること目的に実験を行った。結果、自然風中における比較的ゆっくりとした数度程度の風向変化に相当するような風向変動を持つ気流を作成することが出来た。具体的には、風向9度程度に相当する変化を、2秒から20秒の変化時間で作成できることを確認している。

そして、風向変化気流下における角柱模型表面風圧測定実験では、2秒で風向変化した場

合に、模型側面に比較的大きな負圧が発生し、変化前後と異なる周波数のパワースペクトル密度が現れることが分かった。これらから、風向変化を考慮することで、定常な実験では再現することのできない現象をとらえられる可能性を示した。

(c) 「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」(2009)*1-8

筆者等によるこの研究では、外村の研究における実験手法を再確認し、より詳細な実験に基づいて風向変化の影響を明らかにすることを目的とした。

前述した外村の実験では、測定上の問題から、角度を正しく計測することが出来なかったため、計算的に補正して実験を行っていたが、その結果については疑問が残っていた。そこで、本研究では計測上の問題を取り除き、より正確な条件の下風向変化気流の作成を行った。結果、約10度程度の風向変化を2秒以上の任意の変化時間で風洞内に安定して生み出せることを確認した。

(d) 「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」(2009)*1-9

筆者等によるこの研究では、上述した研究にて作成した気流の下で、非定常風向変化の角柱模型の表面圧力への影響を確認した。

外村による実験では模型の圧力を適切に評価出来ていないと考えられたため、本実験にて、定常時、及び非定常風向変化時の角柱表面風圧を測定した。その結果、定常状態における風圧分布の妥当性を確認したとともに、特に2秒で風向を変化させた場合に、正圧と負圧のピークが入り混じったような風圧係数の変化を確認した。

(e) 「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」(2010)*1-10

筆者等によるこの研究では、前年の研究における実験の手法をさらに改善し、また、円柱模型周りの表面風圧についても測定することで、模型に作用する気流について、より多面的に確認した。

風向変化時に模型に作用する風速が変化しないようにするため、風速の鉛直分布をよりなだらかなものとした。また、円柱模型の表面風圧を測定して、分布の様子から作用する風向などについて記述した。また、非定常風向変化時に測定される不自然なピークについて、静圧の変化の影響である可能性を示唆した。

ここで、より現象の解明に近づくための実験を行う上で、2次元的な実験に限定される1列複数ファン風洞における実験に限界を感じた。

1.3 本論の構成

本論の目的は次のようなものである。

- 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

最終的に風向変化気流が建物の風圧特性に与える影響を明らかにすることを目的としているが、それには段階的に目標を達成していく必要がある。各章でそれぞれの目的達成を目指しつつ、実験内容について説明していく。

2章では、主に1)の目的の達成を目指す。新たに設置された3列複数ファン風洞について、風洞の概要を説明し、風洞内の平均風速分布などの基本的な特性を、基本的な入力波を与えた実験から求める。

3章では、主に2)の目的の達成を目指す。非定常に風向が変化する気流を作成する。1列複数ファン風洞において行われた実験の手法を元に、最大でどの程度の風向変化が確認かを確認し、ファンに対する入力データとして作成する。

4章では、主に3)の目的の達成を目指す。非定常に気流が変化する場において、どのように風洞内の静圧が変化するかを確認する。また、基準静圧点の決定など、次に行う圧力測定実験の方法を確立する。

5章にて、4)の目的の達成を目指す。風洞内に圧力測定用モデルを設置し、非定常な風向変化を起こす気流下で、圧力測定実験を行う。この実験によって、非定常な風向変化が建物の風圧特性に与える影響について明らかにする。

-第 2 章-

3 列複数ファン風洞の概要と基礎性能

2.1 本章の概要

本章では、本実験に用いた風洞設備についての詳細を記述する。

本研究で主に用いる 3 列複数ファン風洞は 2010 年 7 月に改修、設置されたものである。もともとは縦に 6 個のファンが並んだ 1 列複数ファン風洞としてあったものであるが、より詳細な実験を行うために、左右に 1 列ずつ合計 12 個のファンを増設する形で改修されたものである。よって、本風洞における実験は今まで無く、かつ研究を目的とした試作風洞という側面から、風洞の性能については分かっていないことが多い。そこで、本章では本風洞施設の特徴や基本的事項について紹介を行った後、単純な条件の下で実験を行い、本風洞の基本的な特徴を明らかにする。

なお、3 列複数ファン風洞の実験結果の比較に用いた 1 列複数ファン風洞及び境界層風洞の概要については付録にて説明する。

2.2 風洞設備の概要

2.2.1 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月に東京大学柏キヤ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。

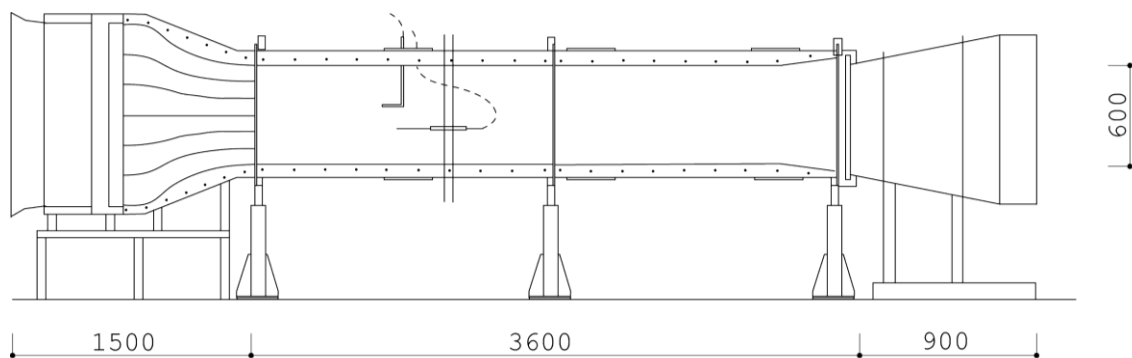


図 2.1 風洞概要

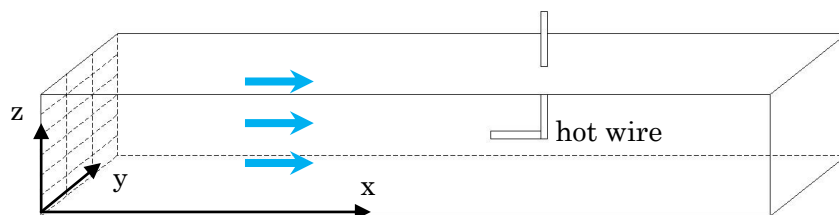


図 2.2 座標設定



図 2.3 3列複数ファン風洞外観



図 2.4 風洞上部の様子

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。

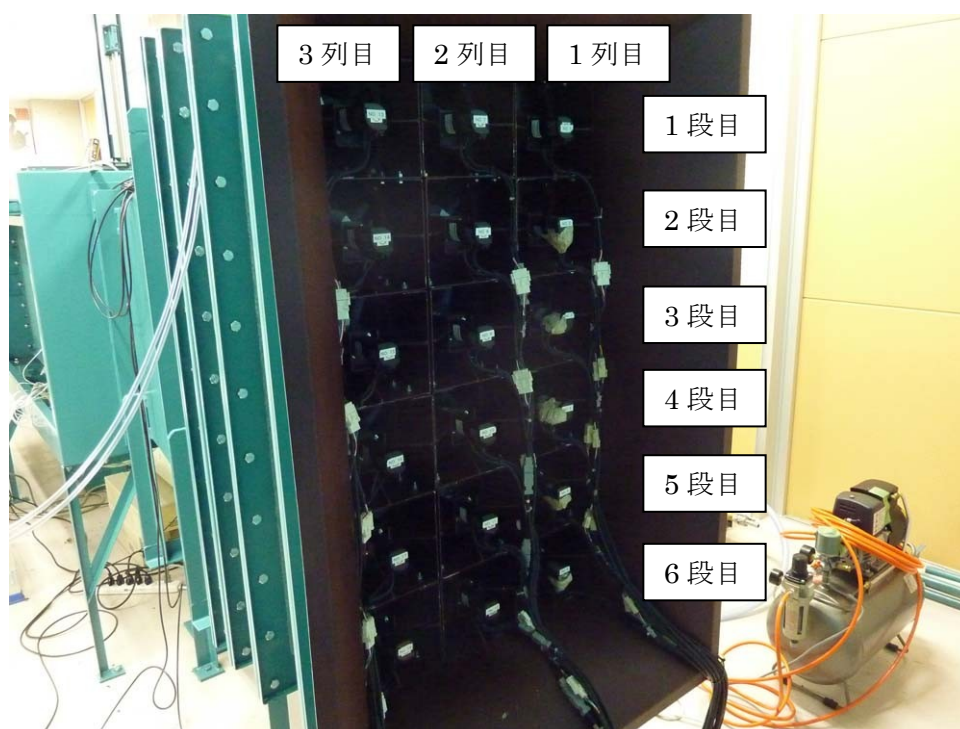


図2.6 ファンの様子

表2.1 ACサーボモータとファンの諸性能

ファン		ACサーボモータ	
形式	2段羽タイプ	定格出力	100W
直径	180mm	定格トルク	0.318Nm
最大風量	11.2m ³ /mm	瞬間最大トルク	0.960Nm
最大静圧	28.0mmAq	トルク定数	0.156Nm/A
騒音	65db	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

2.2.2 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 $Vlto$ 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 の入力の際に行えるといえる。

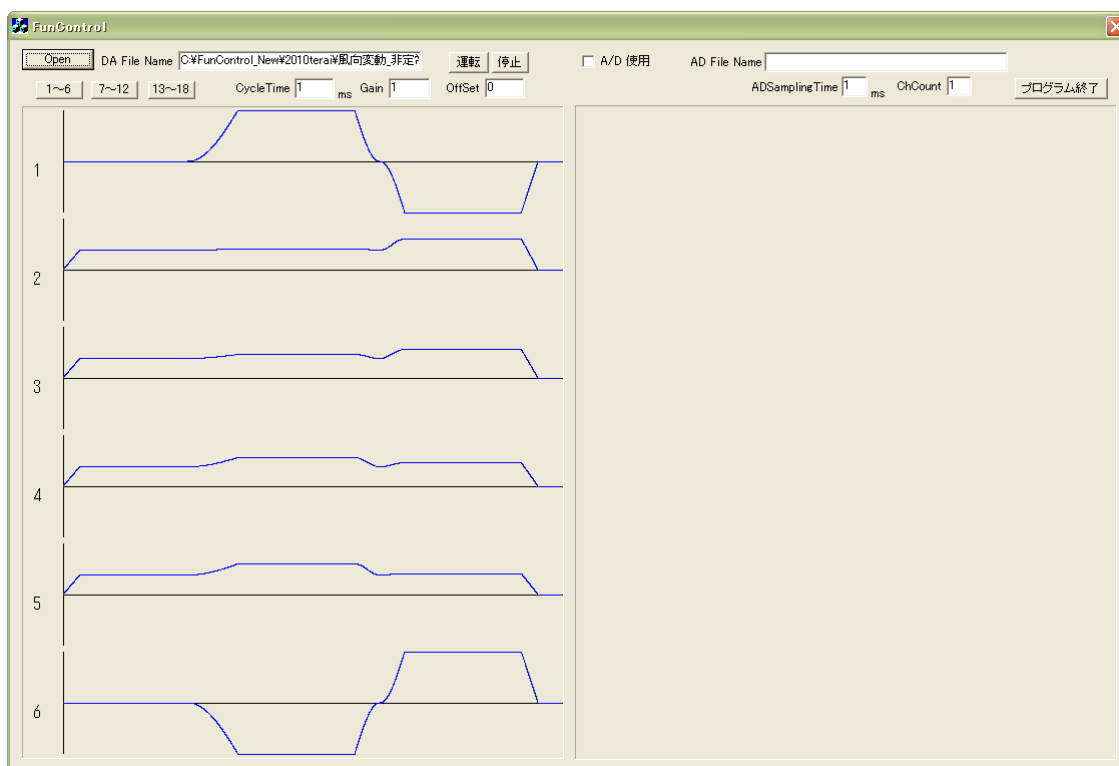


図 2.7 複数ファン制御プログラム

2.2.3 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。

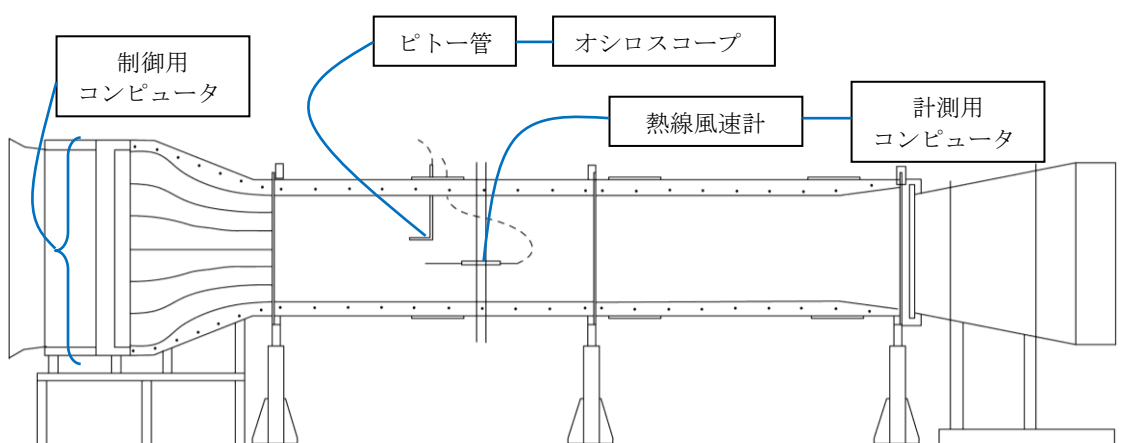


図 2.8 風速測定システム図

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

2.3 3列複数ファン風洞の基本的特性

2.3.1 風洞内の気流分布の確認

一定の入力を与えた時の測定洞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、測定洞内の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、 $x=500\text{mm}$, 1000mm , 1500mm , 2000mm , 2500mm , 3000mm の計6点、y方向には、 $y=100\text{mm}\sim 500\text{mm}$ を 100mm 毎に計5点、z方向には、 $z=50\text{mm}\sim 550\text{mm}$ を 50mm 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洞内の風速、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。

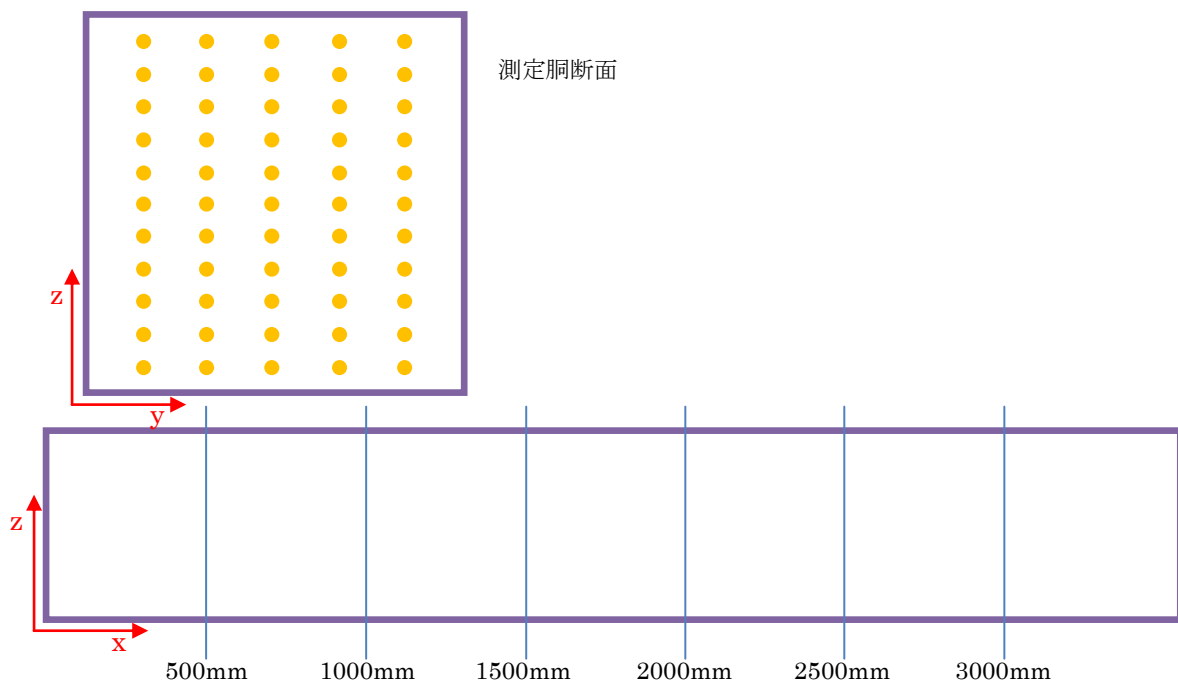


図 2.9 測定位置

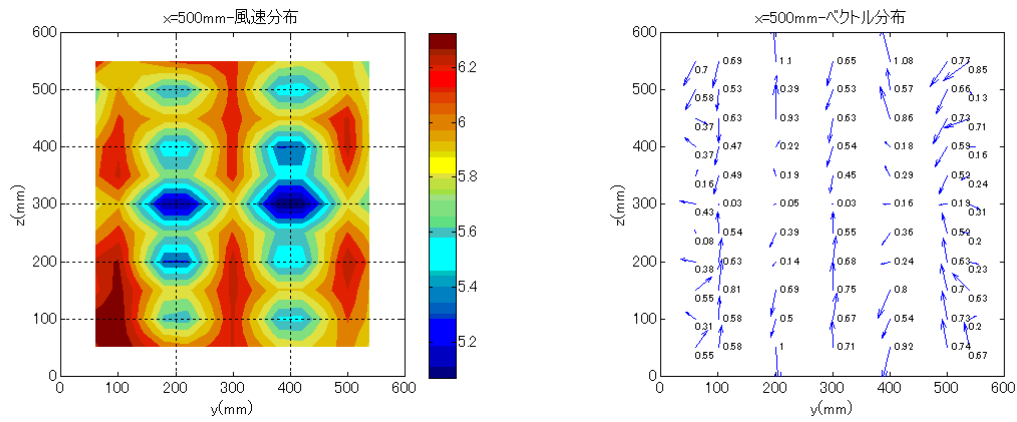


図 2.10 $x=500\text{mm}$ 平面における風速、風向分布

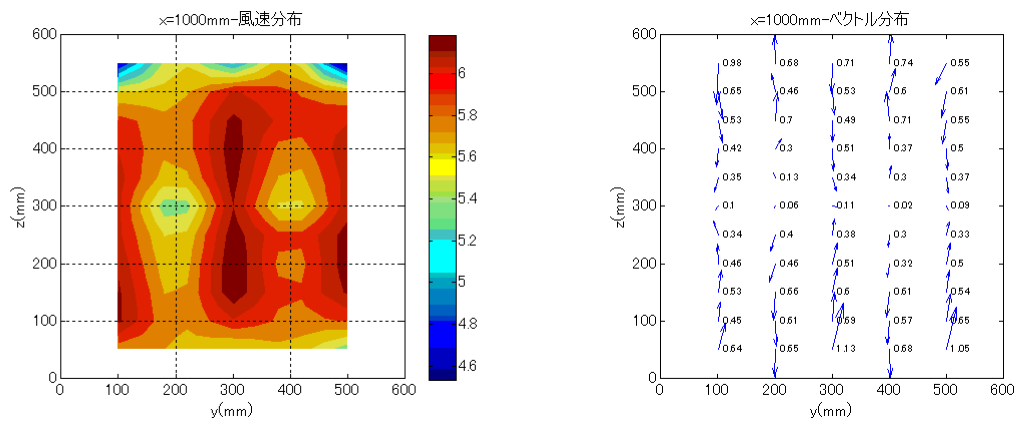


図 2.11 $x=1000\text{mm}$ 平面における風速、風向分布

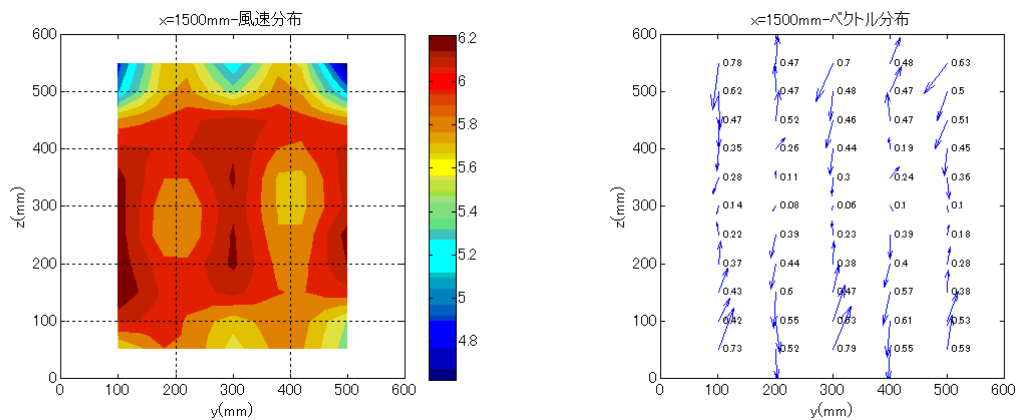


図 2.12 $x=1500\text{mm}$ 平面における風速、風向分布

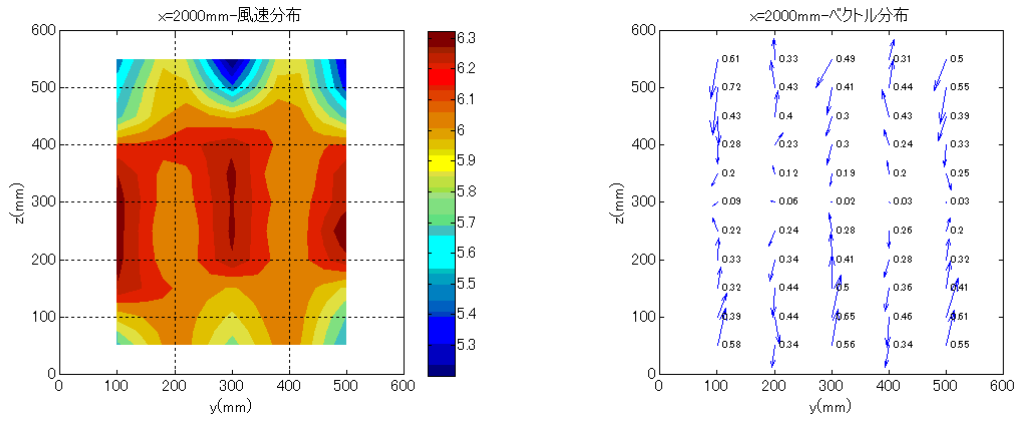


図 2.13 $x=2000\text{mm}$ 平面における風速、風向分布

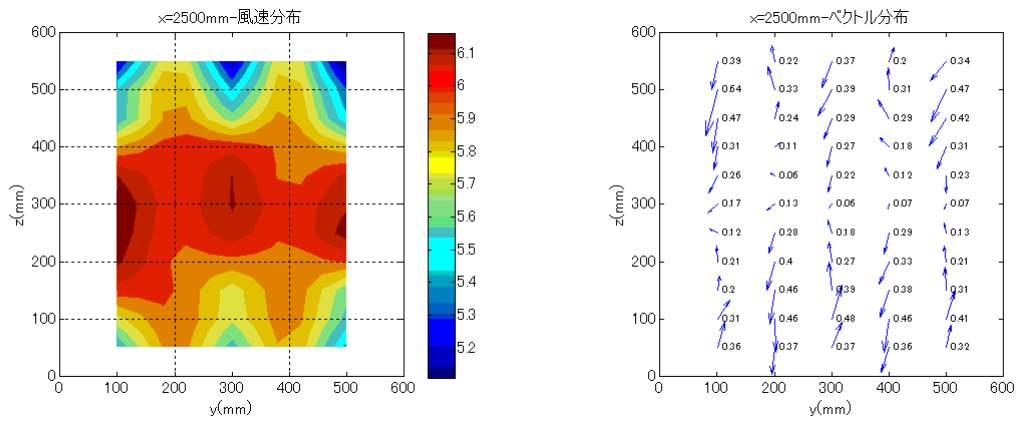


図 2.14 $x=2500\text{mm}$ 平面における風速、風向分布

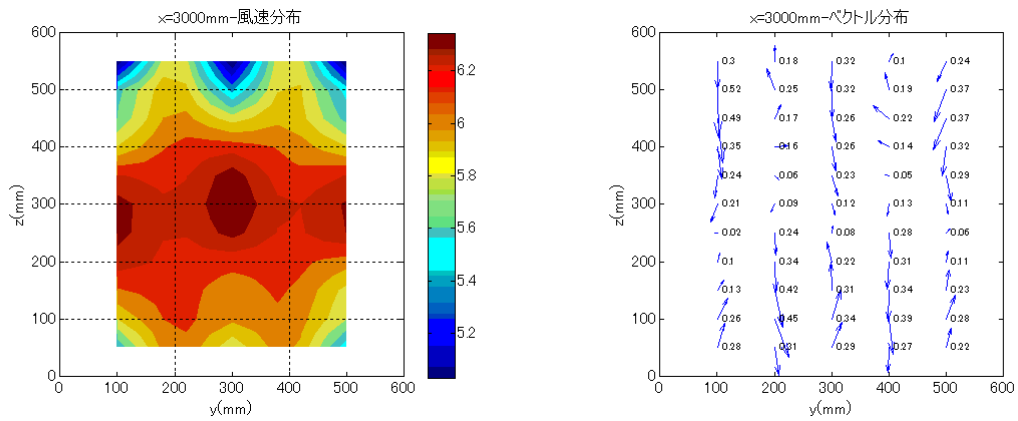


図 2.15 $x=3000\text{mm}$ 平面における風速、風向分布

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 400mm 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。

2.3.2 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_{It} 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_{It} 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。

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

この式は喜々津^{*2-1}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、 $x=1000\text{mm}$, 3000mm の計 2 点、y 方向には、 $y=100\text{mm} \sim 500\text{mm}$ を 100mm 毎に計 5 点、z 方向には、 $z=50\text{mm} \sim 550\text{mm}$ を 50mm 毎に計 11 点の計 110 点について、入力電圧 V_{It} 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。

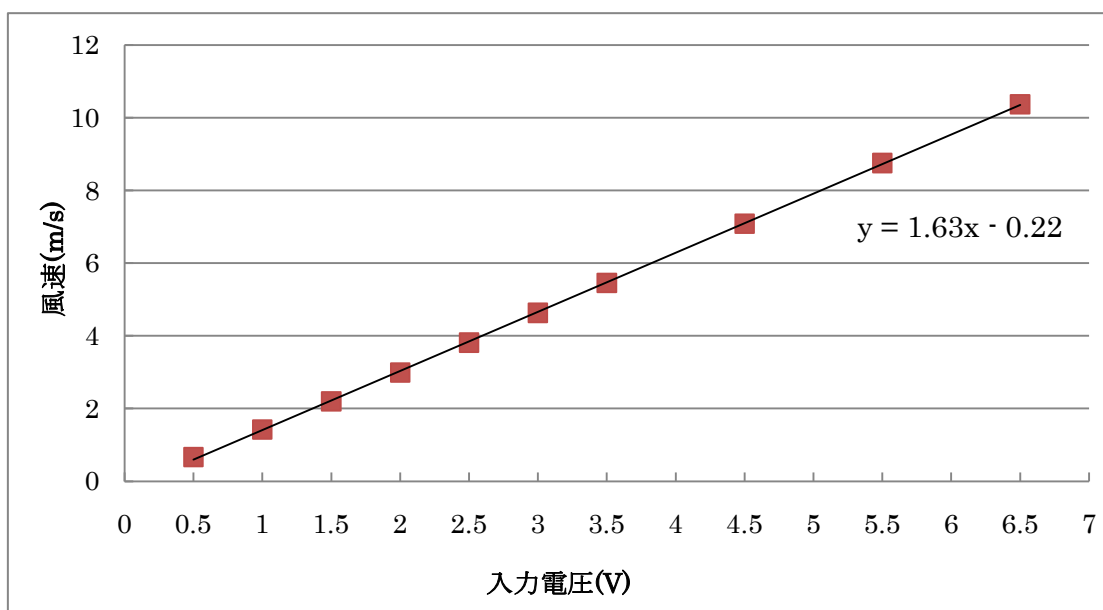


図 2.16 入力電圧と平均風速の関係

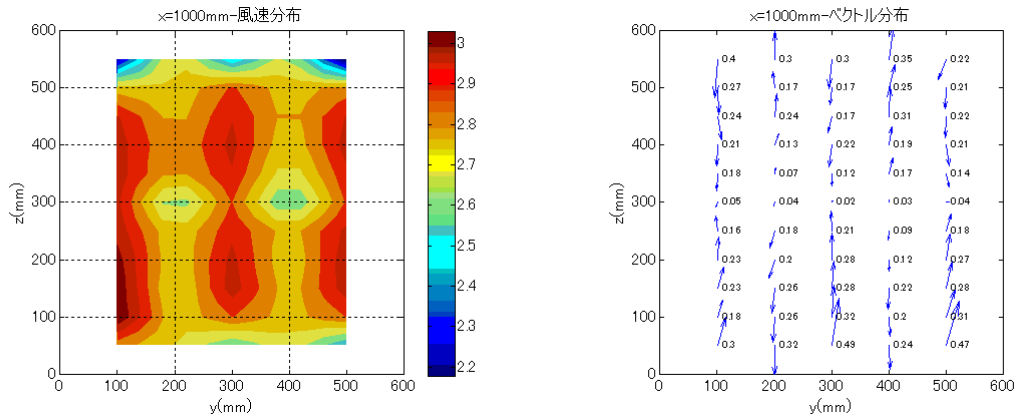


図 2.17 x=1000mm 平面の 2v 入力での風速、風向分布

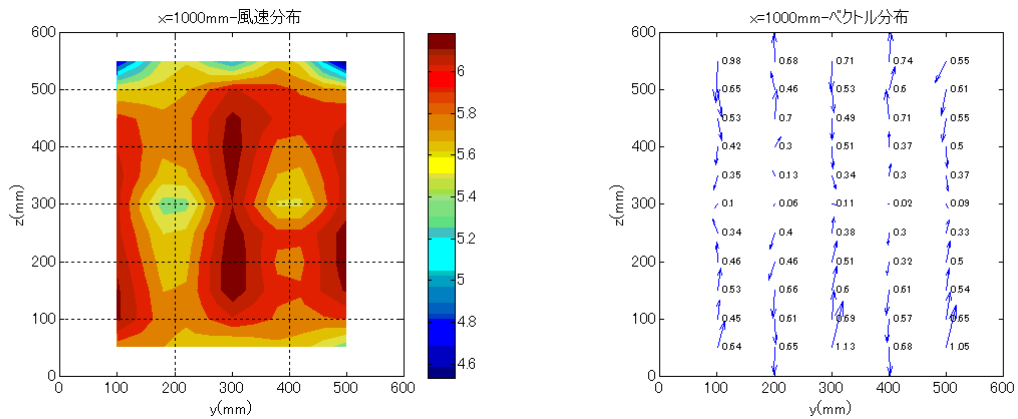


図 2.18 x=1000mm 平面の 4v 入力での風速、風向分布

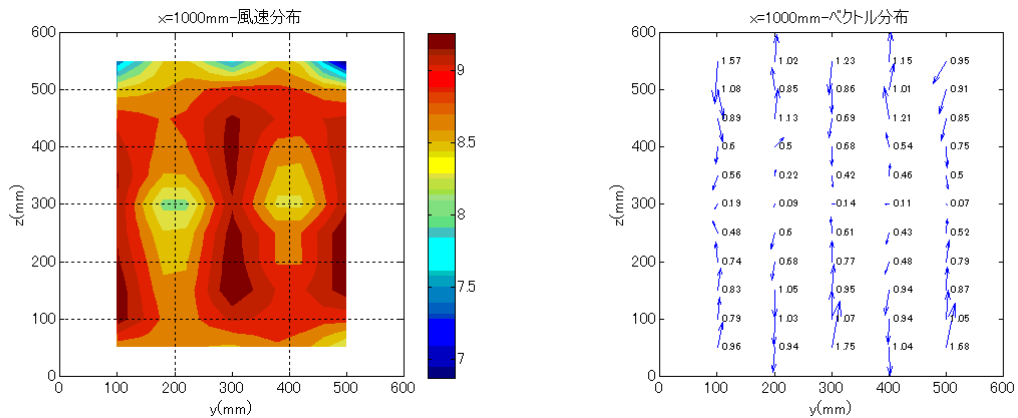


図 2.19 x=1000mm 平面の 6v 入力での風速、風向分布

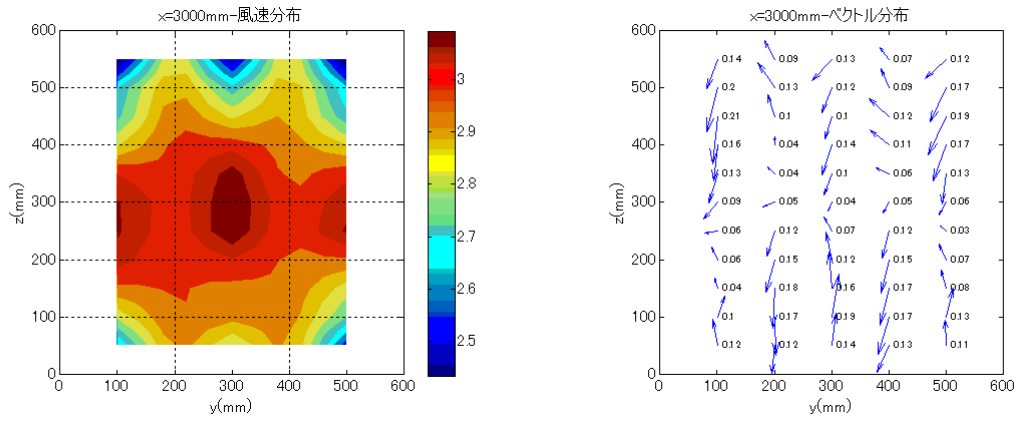


図 2.20 x=3000mm 平面の 2v 入力での風速、風向分布

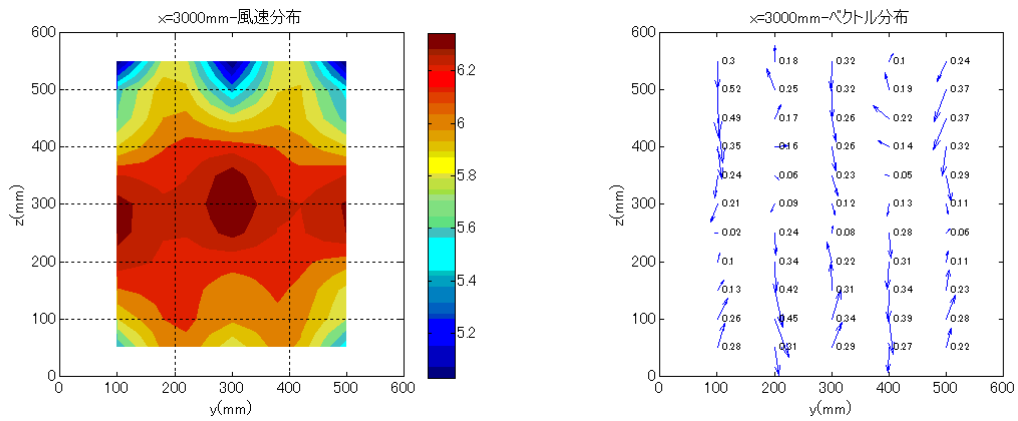


図 2.21 x=3000mm 平面の 4v 入力での風速、風向分布

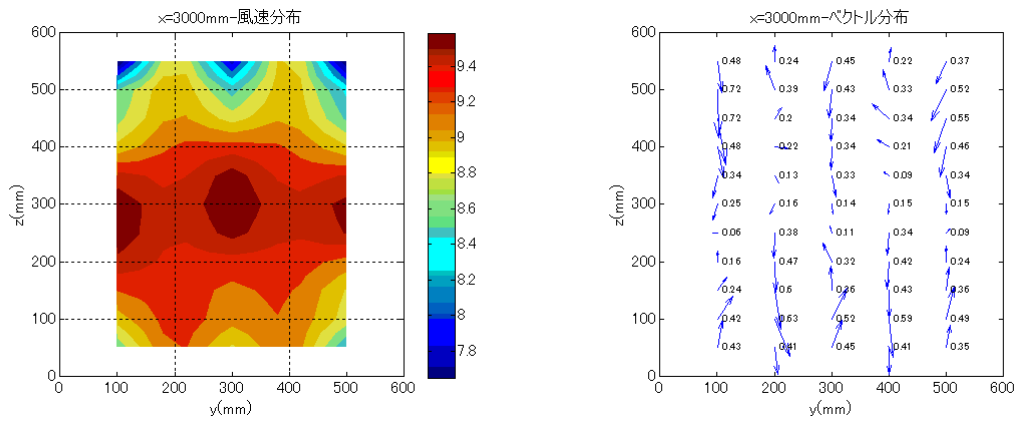


図 2.22 x=3000mm 平面の 6v 入力での風速、風向分布

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 \sim 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。

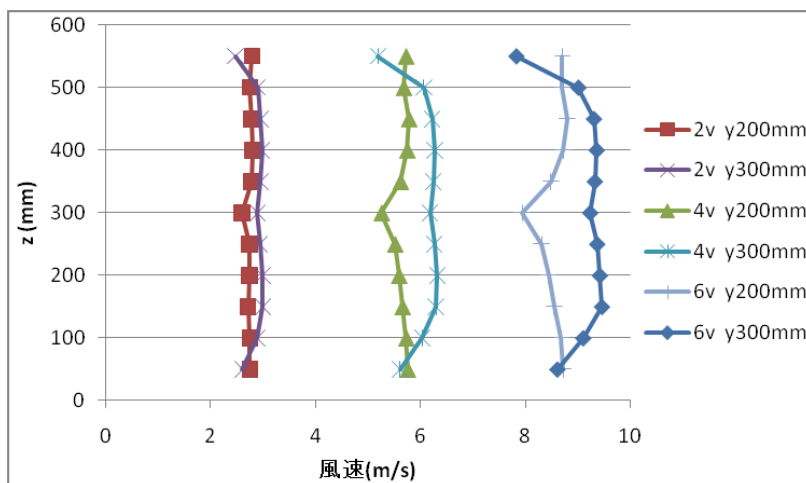


図 2.23 x=1000mm における風速鉛直分布

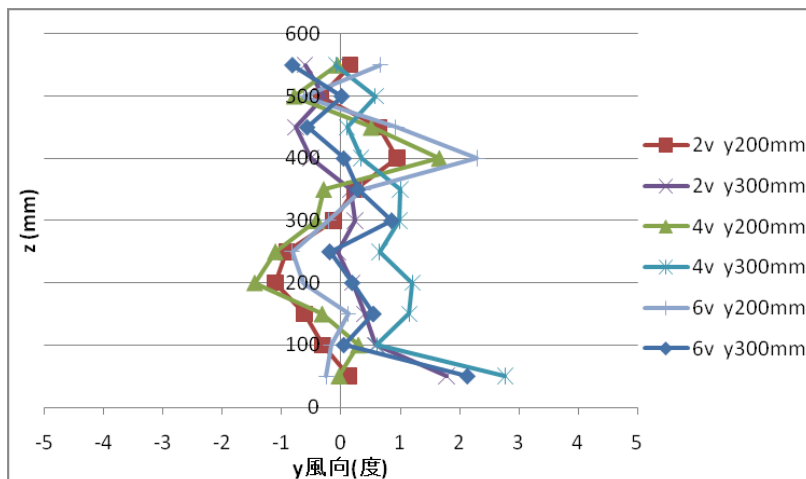


図 2.24 x=1000mm における y 方向の風向鉛直分布

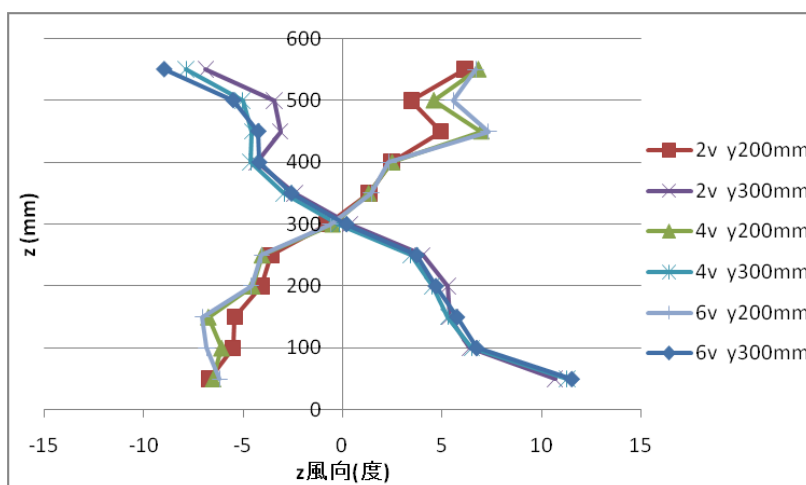


図 2.25 x=1000mm における z 方向の風向鉛直分布

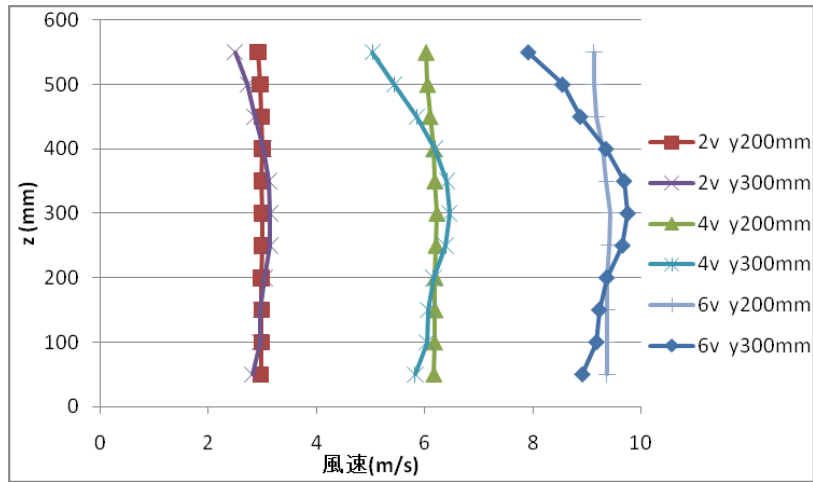


図 2.26 $x=3000\text{mm}$ における z 方向の風速鉛直分布

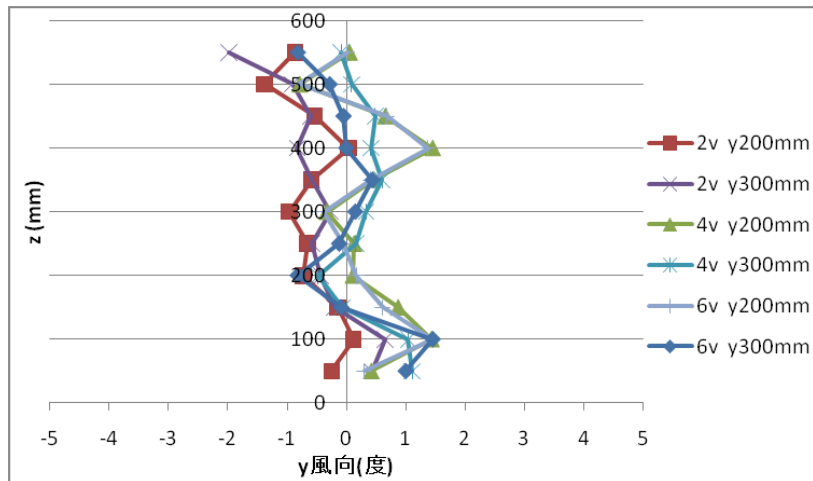


図 2.27 $x=3000\text{mm}$ における z 方向の風向鉛直分布

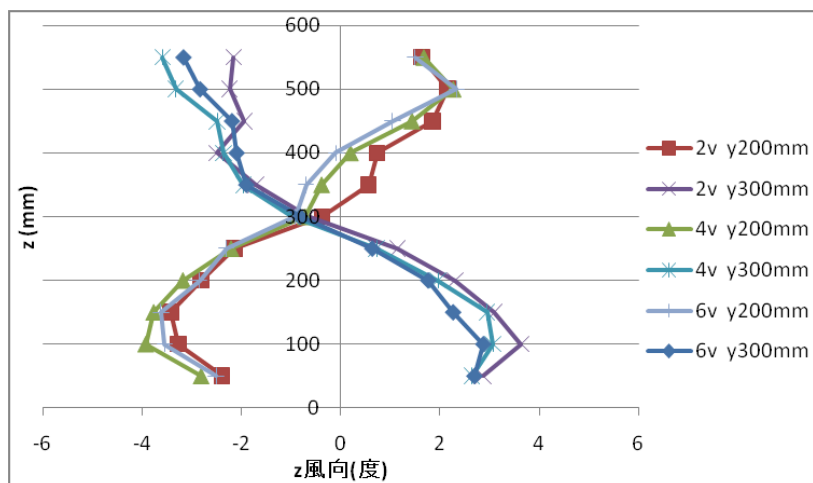


図 2.28 $x=3000\text{mm}$ における z 方向の風向鉛直分布

2.3.3 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。^{*2-2,*2-3} 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 0v から 5v まで 0.5v 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。

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

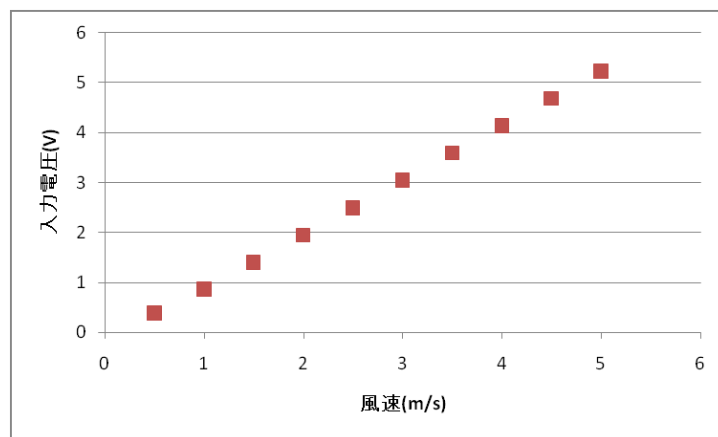


図 2.29 1列複数ファン風洞における入力電圧と風速の関係

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。

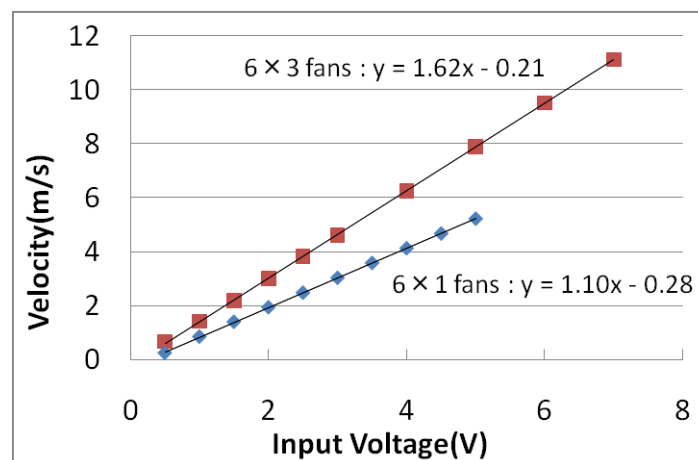


図 2.30 1列と3列における入力電圧と風速の関係

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。

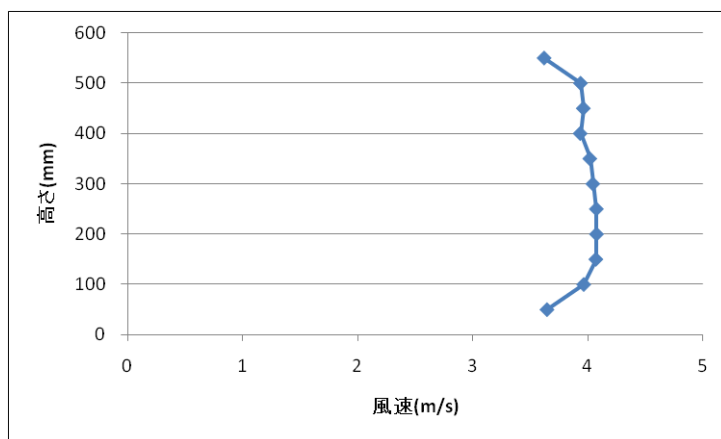


図 2.31 風速鉛直分布

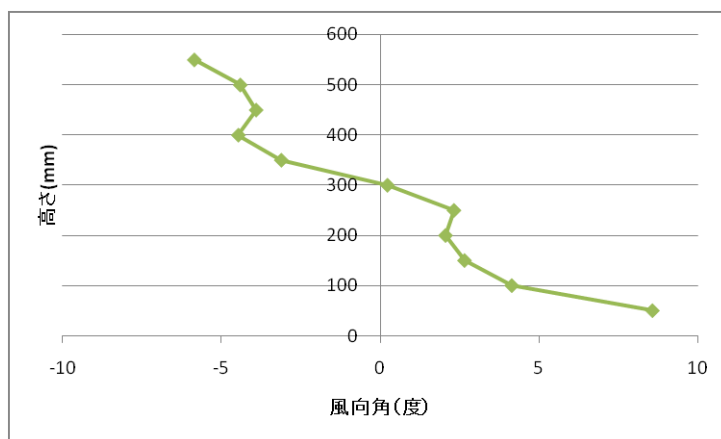


図 2.32 z 風向鉛直分布

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。

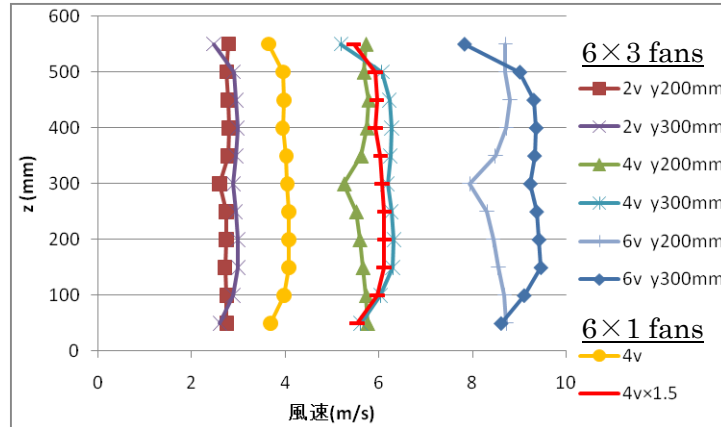


図 2.33 $x=1000\text{mm}$ における風速鉛直分布

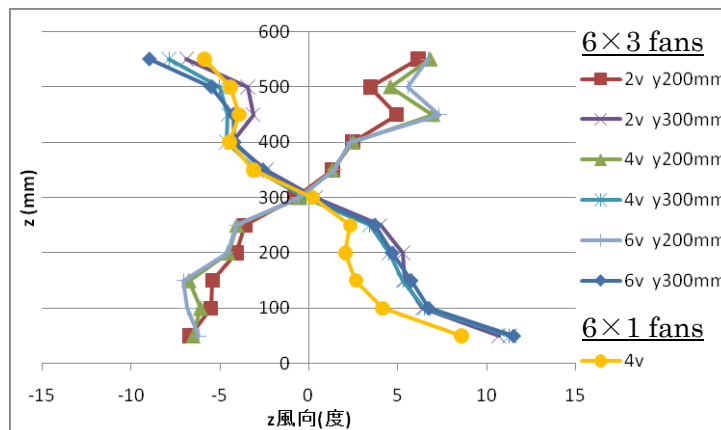


図 2.34 $x=1000\text{mm}$ における z 風向鉛直分布

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3章-

非定常に風向変化する気流データの作成

3.1 本章の概要

本章では、非定常な風向変化を持った気流を作成する。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*3-1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。

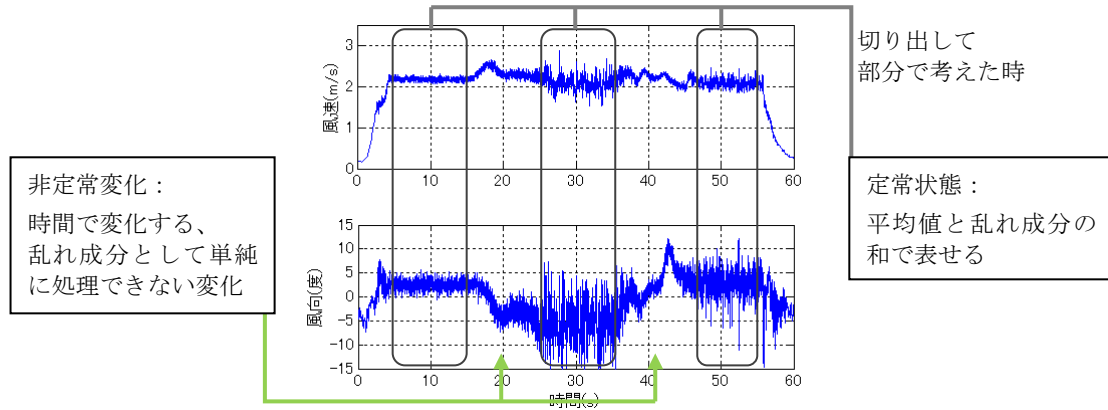


図 3.1 定常と非定常

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、逆に上向きに定常状態である 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。

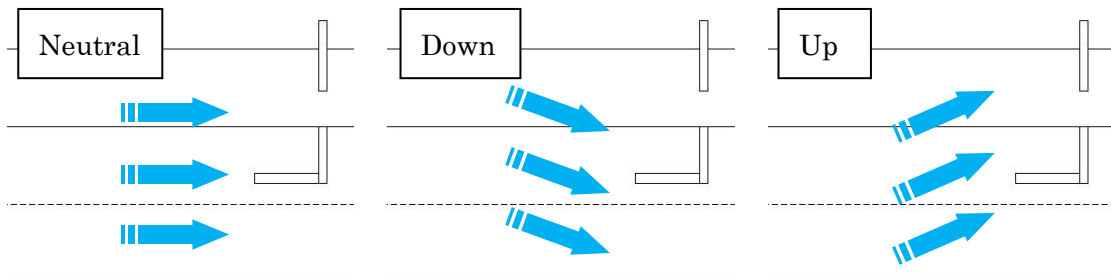


図 3.2 各種の定常状態

3.2 作成目標とする気流性状と実験要件

3.2.1 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^{*3,2}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3.3に風速と風向の鉛直分布を、表3.1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。

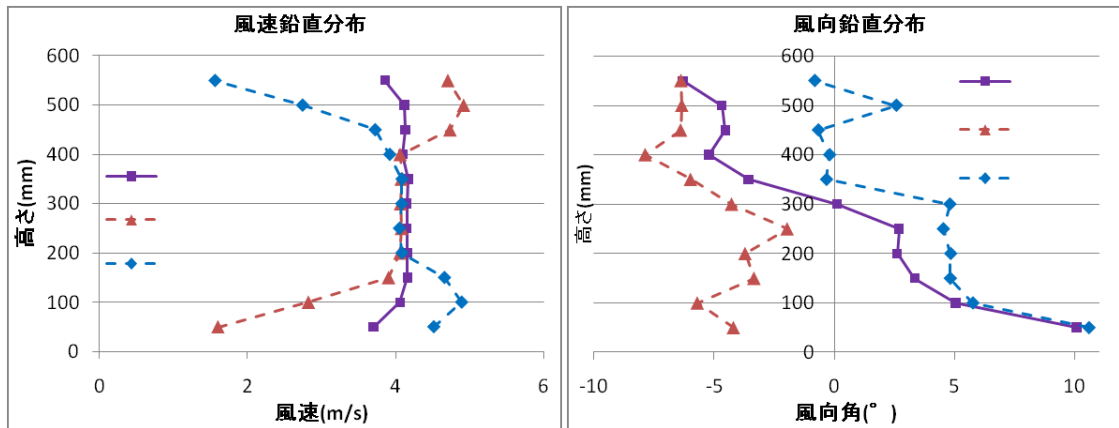


図 3.3 1列複数ファン風洞における風速・風向の鉛直分布

表 3.1 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。

3.2.2 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次元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。

3.3 上下端のファンに対する入力値の調整

3.3.1 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 3.4** 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 100mm ごとに計 10 点、 z 方向は $200\text{mm}\sim 400\text{mm}$ の間で 50mm 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 3.5** に結果を示す。

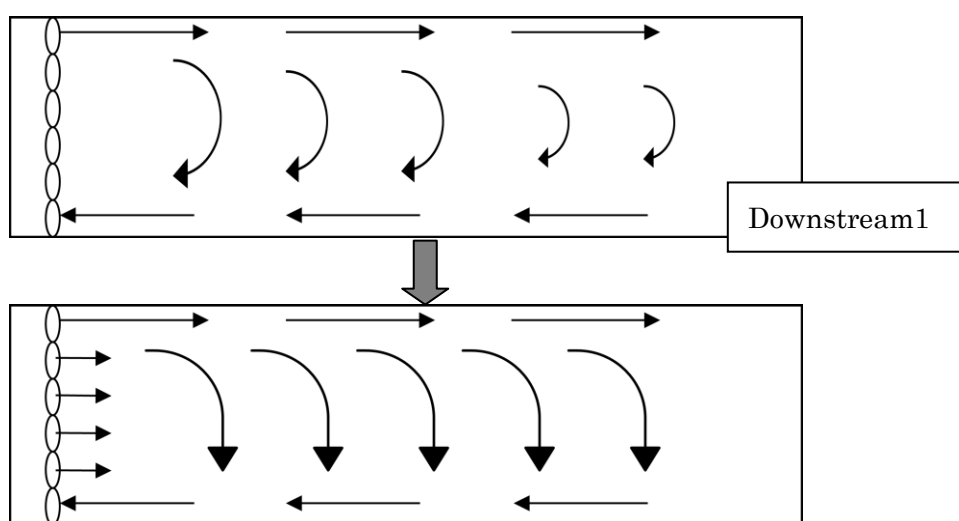


図 3.4 制御の方向性

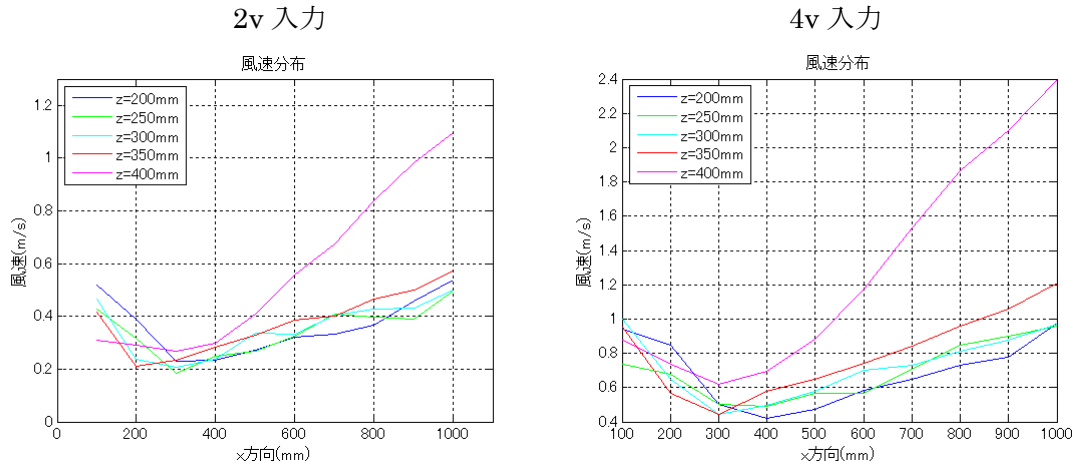


図 3.5 Downstream1 の計測結果

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 1.1m/s 、 2.4m/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、

$$\tan\left(\frac{Vlt_{1,6} \times 0.25}{Vlt_{2,3,4,5} \times 1.63 - 0.22}\right) < \tan\frac{\pi}{4} \quad (3.1)$$

$Vlt_{1,6}$: 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、

$$Vlt_{2,3,4,5} > \frac{1}{\pi \times 1.63} \times Vlt_{1,6} + \frac{0.22}{1.63} \quad (3.2)$$

となり、 $Vlt_{1,6} = 4$ としたとき、

$$Vlt_{2,3,4,5} > 0.92 \quad (3.3)$$

ここで上下端のファンに対する割合で表現すると、

$$\frac{Vlt_{2,3,4,5}}{Vlt_{1,6}} > 0.23 \quad (3.4)$$

となる。

この **3.4 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

$$\frac{Vlt_{2,3,4,5}}{Vlt_{1,6}} = 0.3 \quad (3.5)$$

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。

3.3.2 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 3.2 に従う。それぞれ 3.5 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_{It0} 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、 $V_{It0}=4$ 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 3.6 から図 3.10 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なっていくことが確認された。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 3.6 の sidechange1、図 3.7 の sidechange2、図 3.8 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 3.6 の sidechange1、図 3.9 の sidechange4、図 3.10 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いくことが確認された。

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 3.2 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

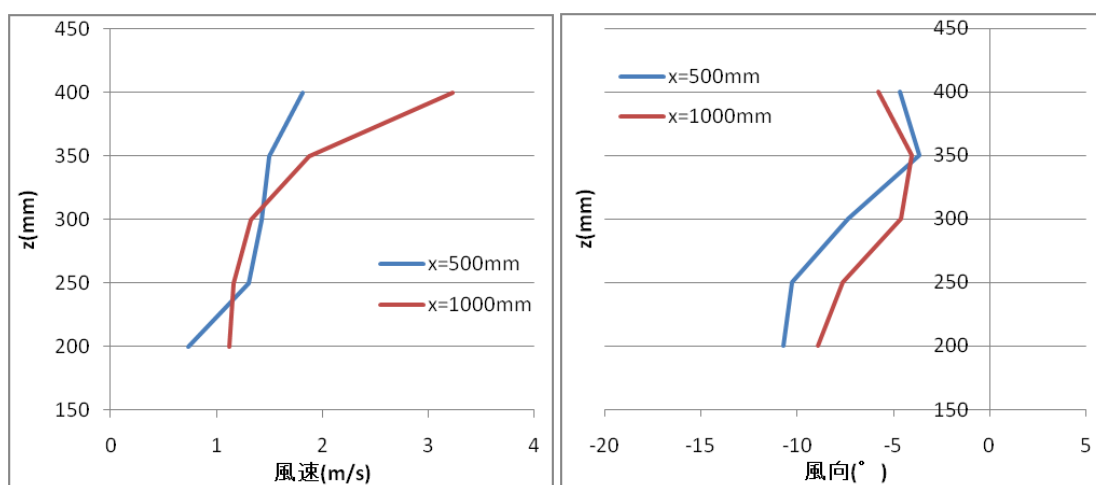


図 3.6 sidechange1 の平均風速・風向鉛直分布

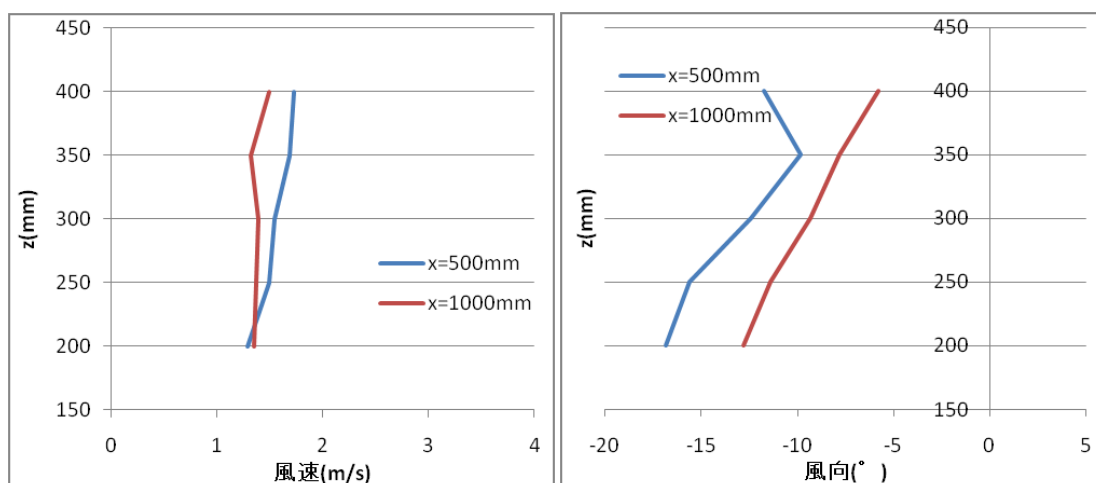


図 3.7 sidechange2 の平均風速・風向鉛直分布

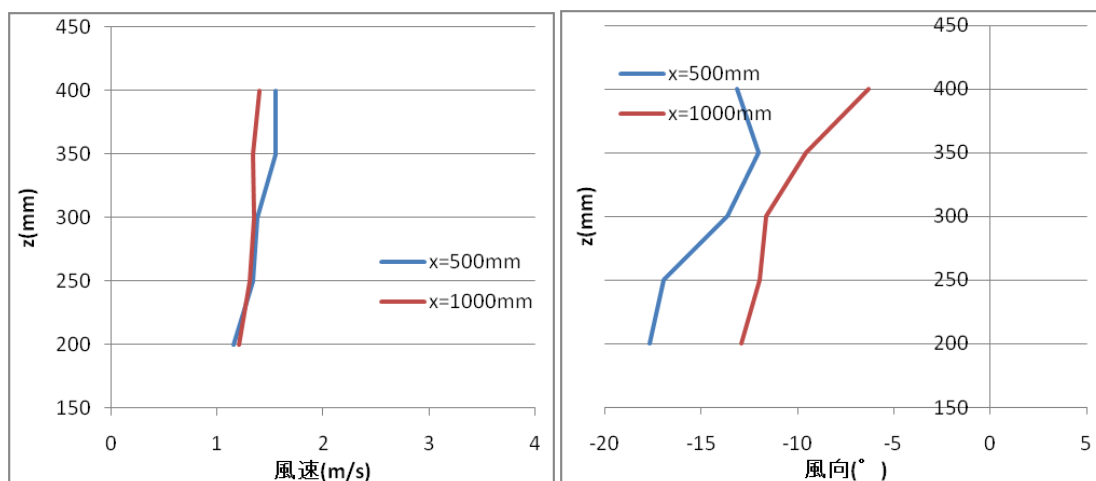


図 3.8 sidechange3 の平均風速・風向鉛直分布

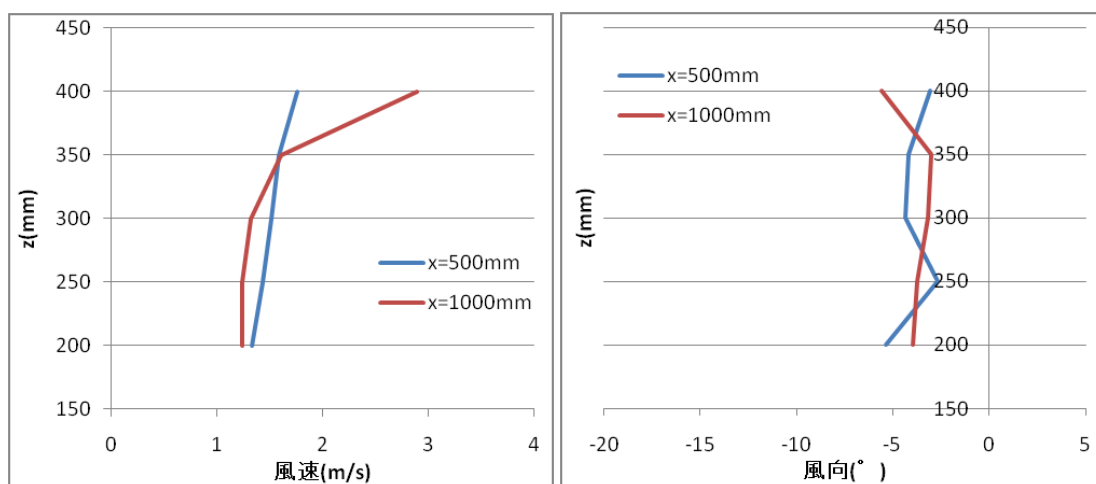


図 3.9 sidechange4 の平均風速・風向鉛直分布

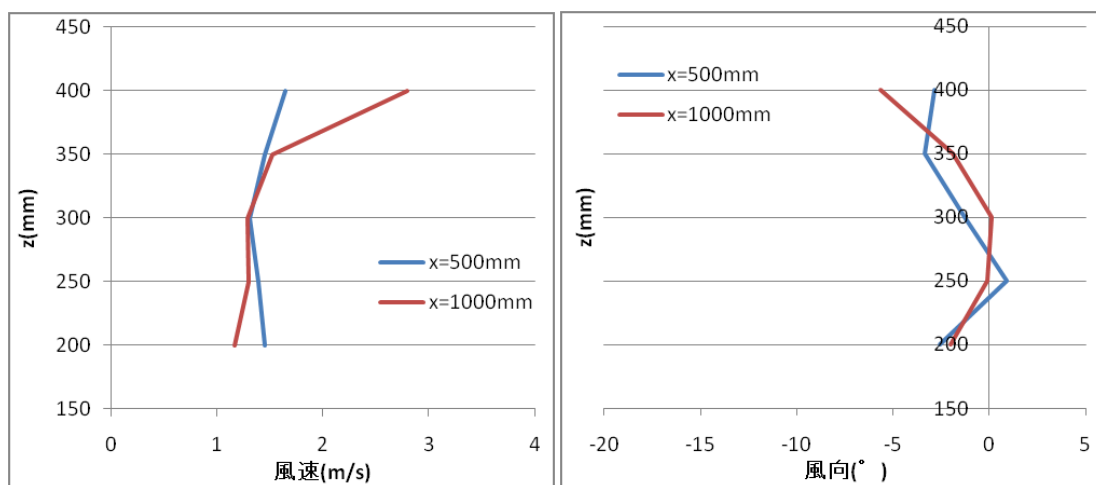


図 3.10 sidechange5 の平均風速・風向鉛直分布

3.4 中央4つのファンへの入力値の調整

3.4.1 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3.3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 Vl_{to} 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3.11から図3.28に示す。また、参考として図3.29に1列複数ファン風洞における測定結果を示す。

表 3.3 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

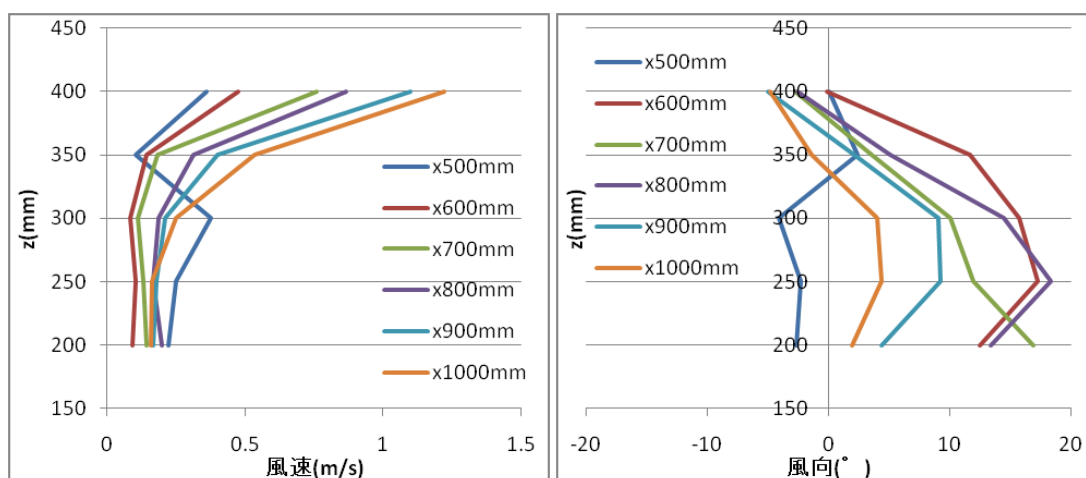


図 3.11 2v 入力_middle1 の平均風速・風向鉛直分布

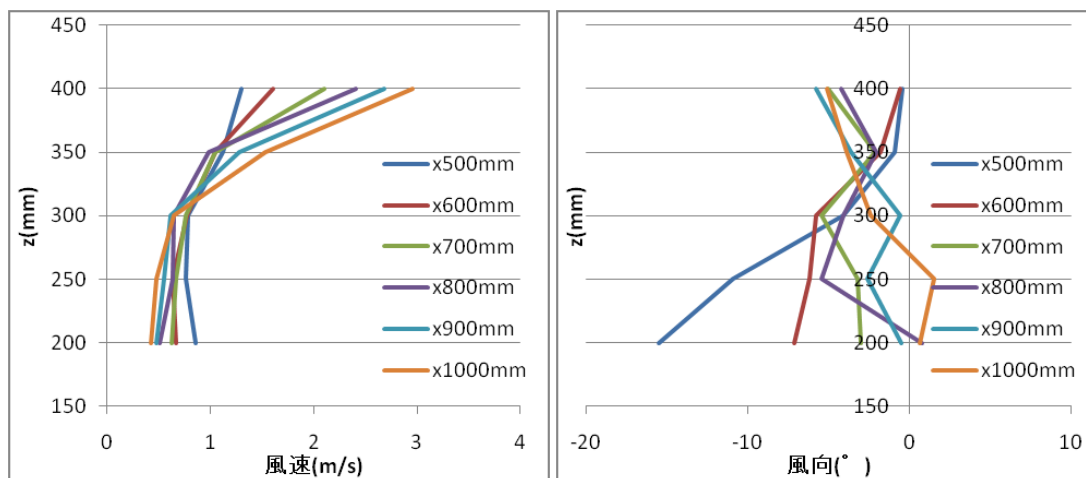


図 3.12 4v 入力_middle1 の平均風速・風向鉛直分布

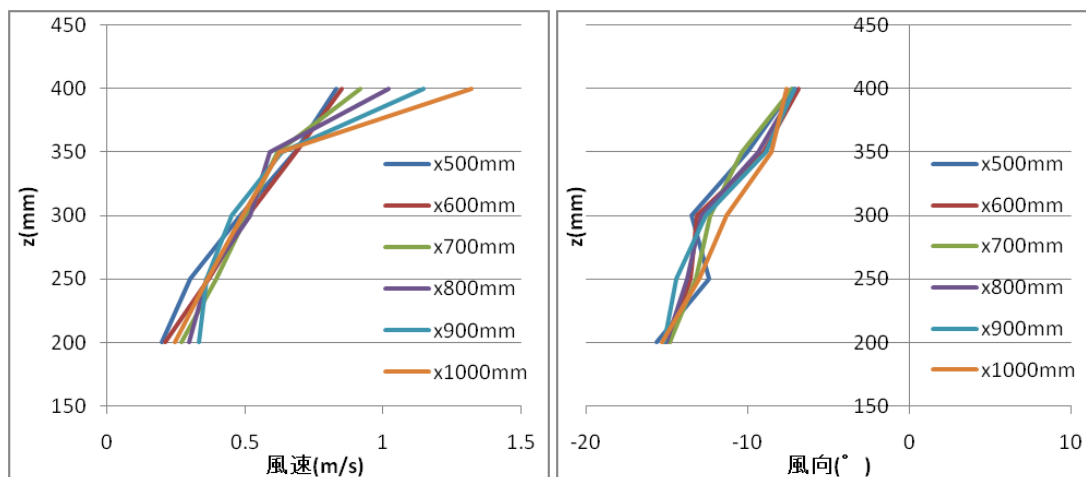


図 3.13 2v 入力_middle2 の平均風速・風向鉛直分布

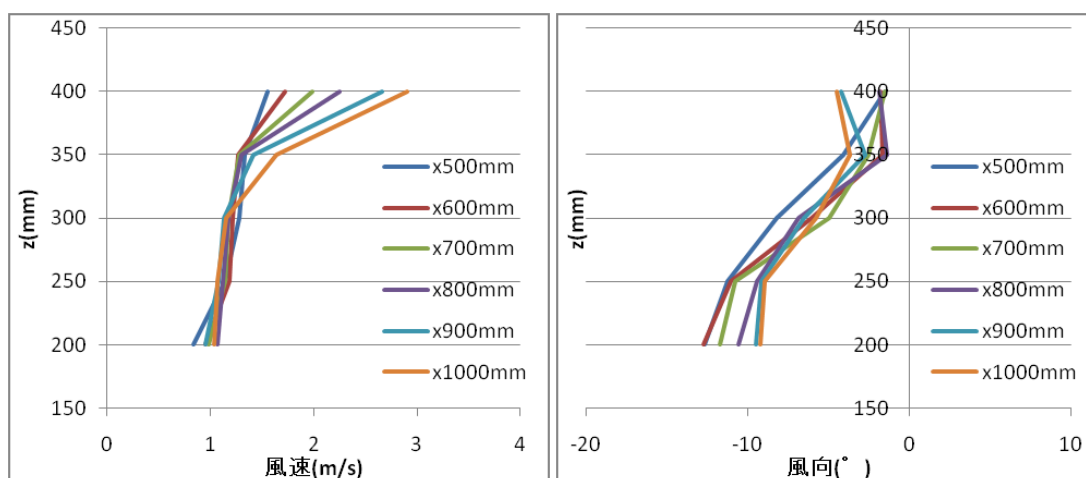


図 3.14 4v 入力_middle2 の平均風速・風向鉛直分布

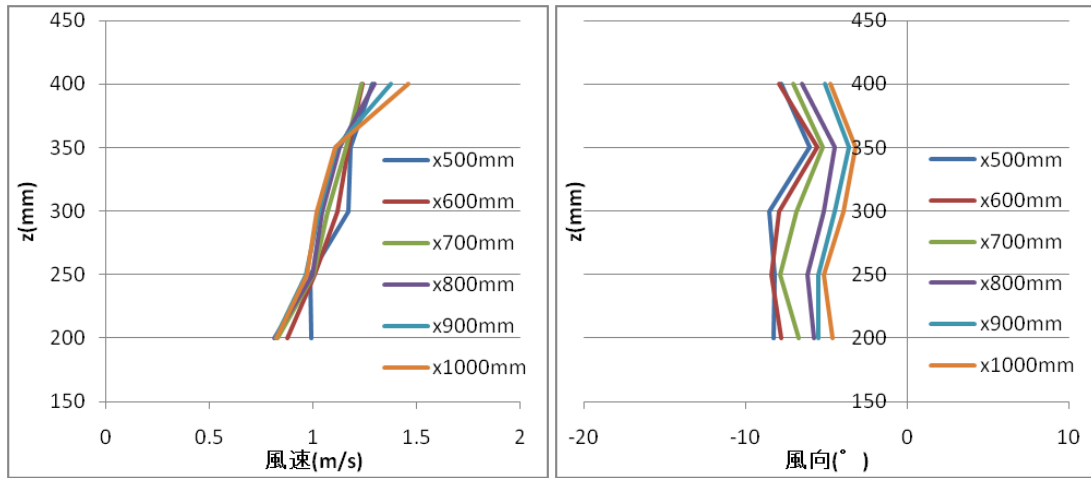


図 3.15 2v 入力_middle3 の平均風速・風向鉛直分布

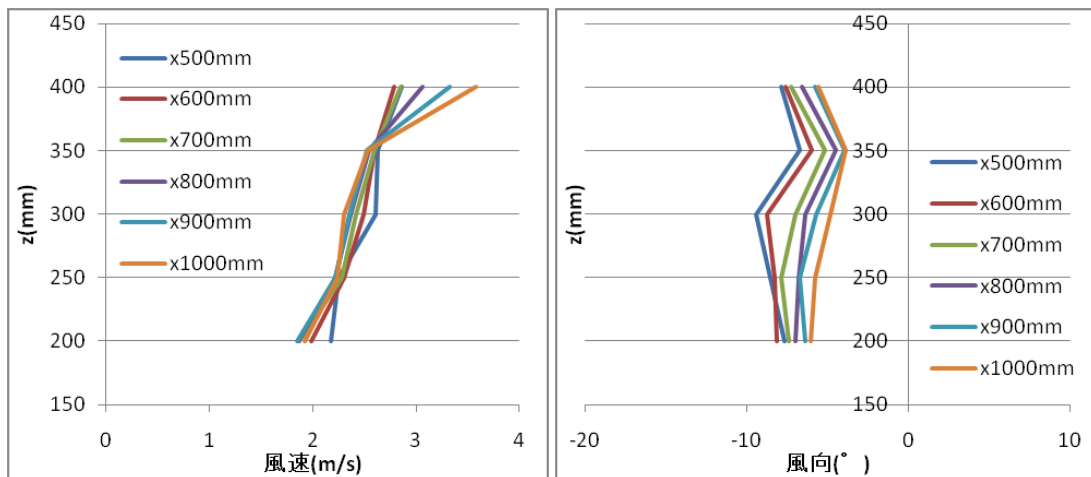


図 3.16 4v 入力_middle3 の平均風速・風向鉛直分布

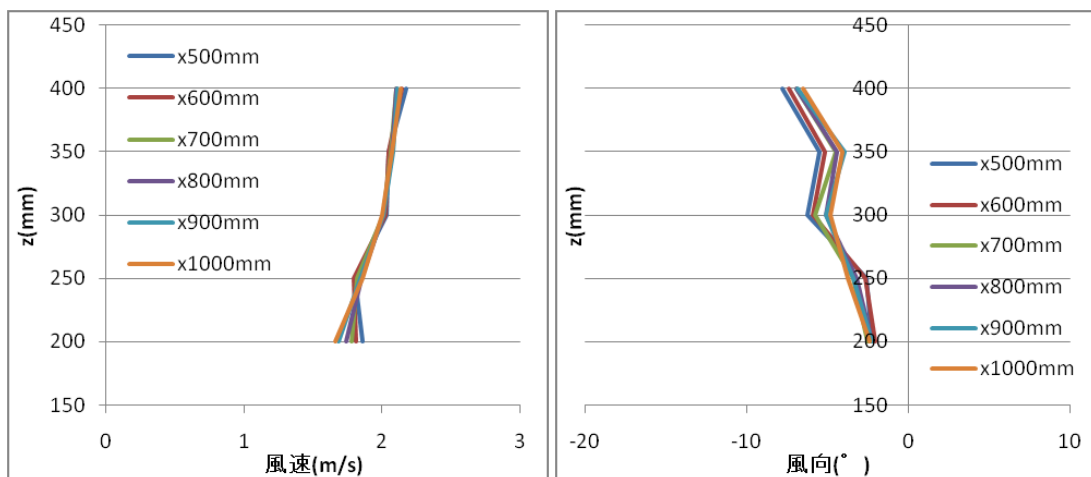


図 3.17 2v 入力_middle4 の平均風速・風向鉛直分布

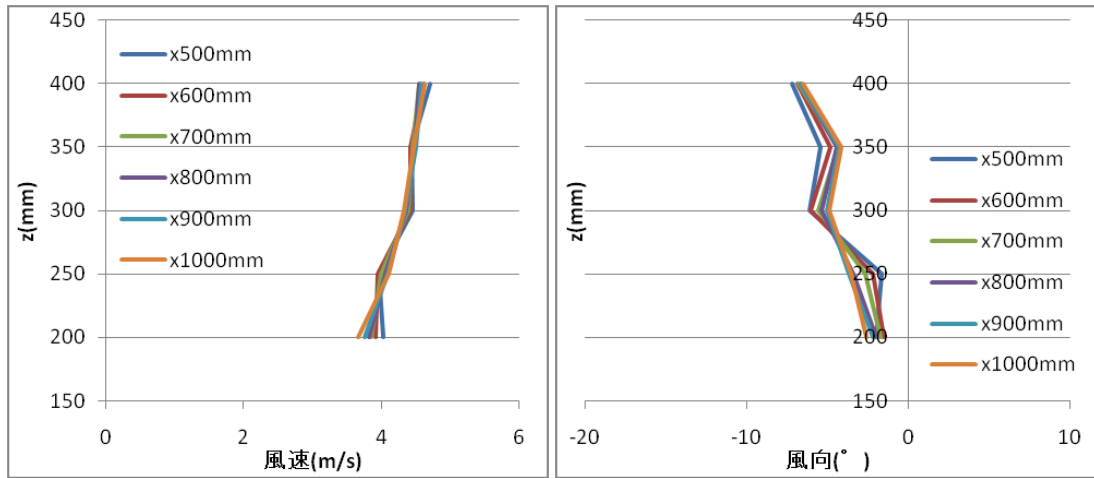


図 3.18 4v 入力_middle4 の平均風速・風向鉛直分布

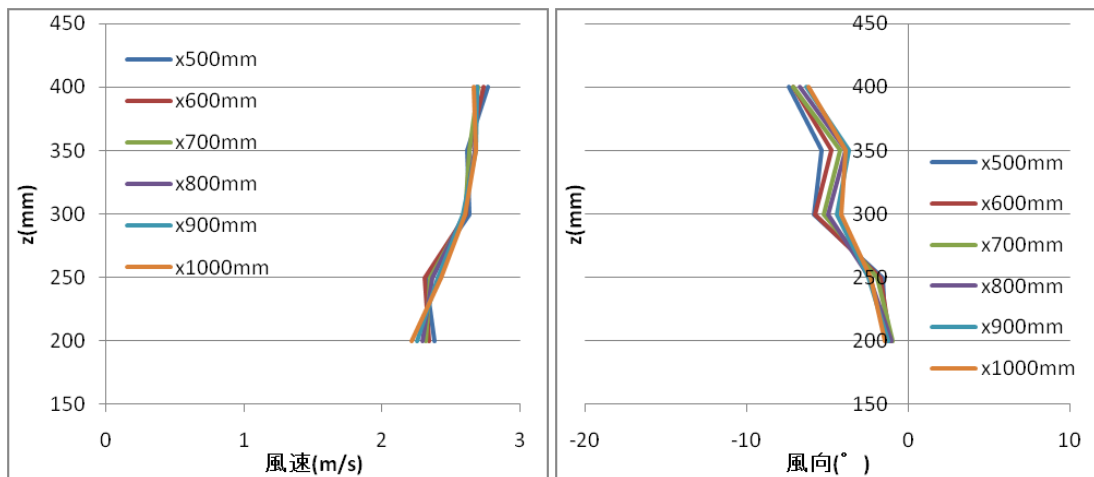


図 3.19 2v 入力_middle5 の平均風速・風向鉛直分布

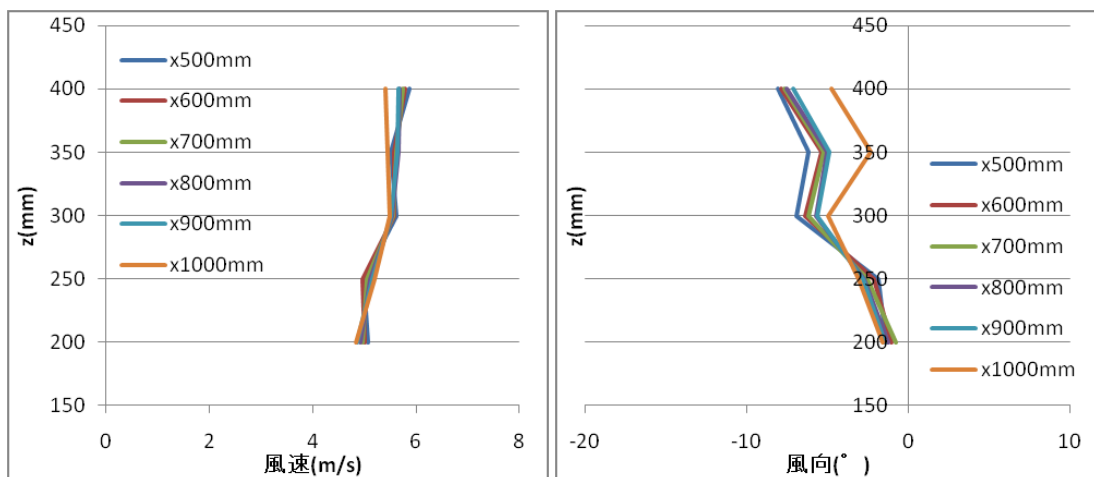


図 3.20 4v 入力_middle5 の平均風速・風向鉛直分布

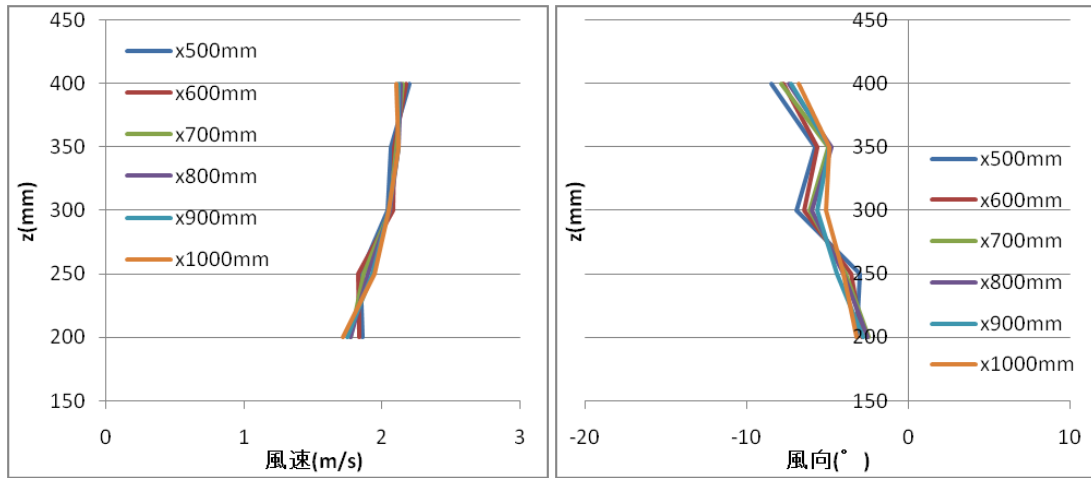


図 3.21 2v 入力_middle6 の平均風速・風向鉛直分布

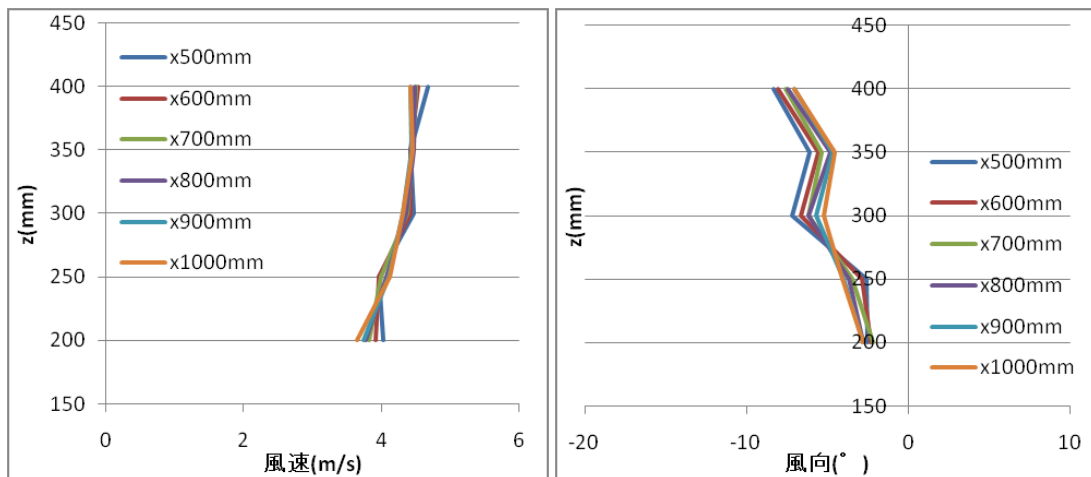


図 3.22 4v 入力_middle6 の平均風速・風向鉛直分布

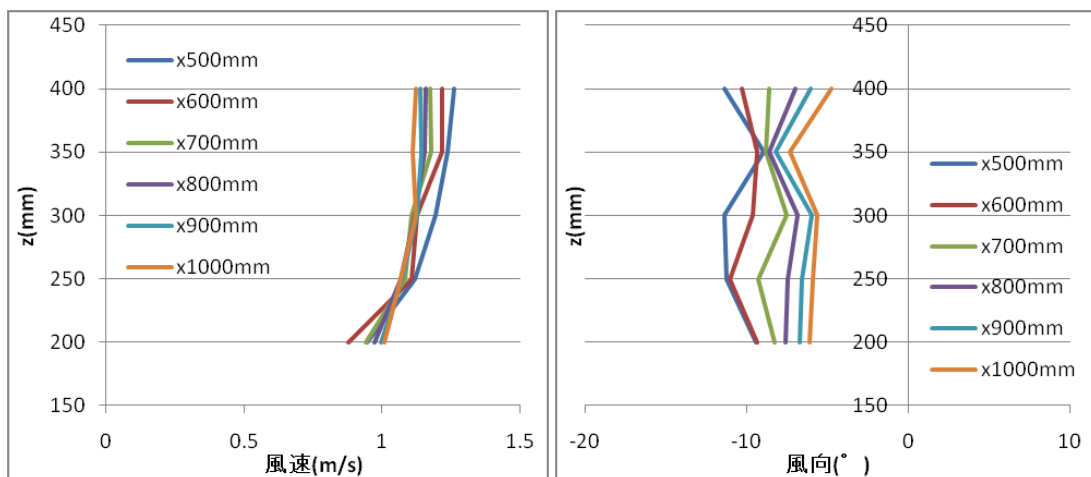


図 3.23 2v 入力_middle7 の平均風速・風向鉛直分布

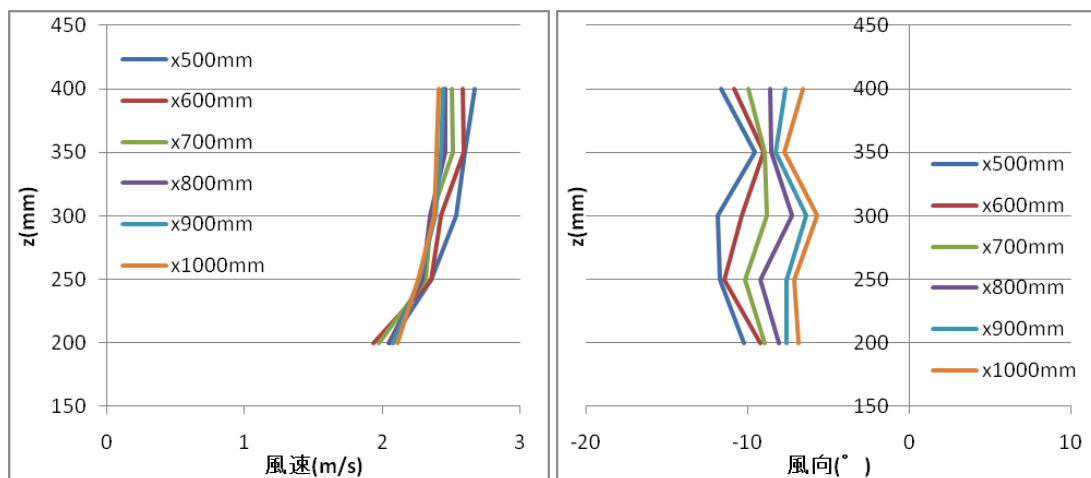


図 3.24 4v 入力_middle7 の平均風速・風向鉛直分布

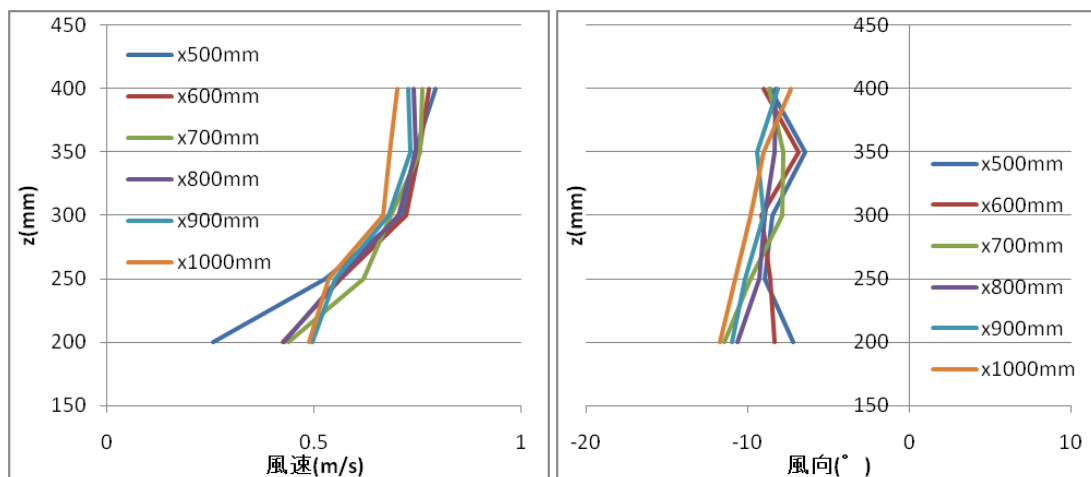


図 3.25 2v 入力_middle8 の平均風速・風向鉛直分布

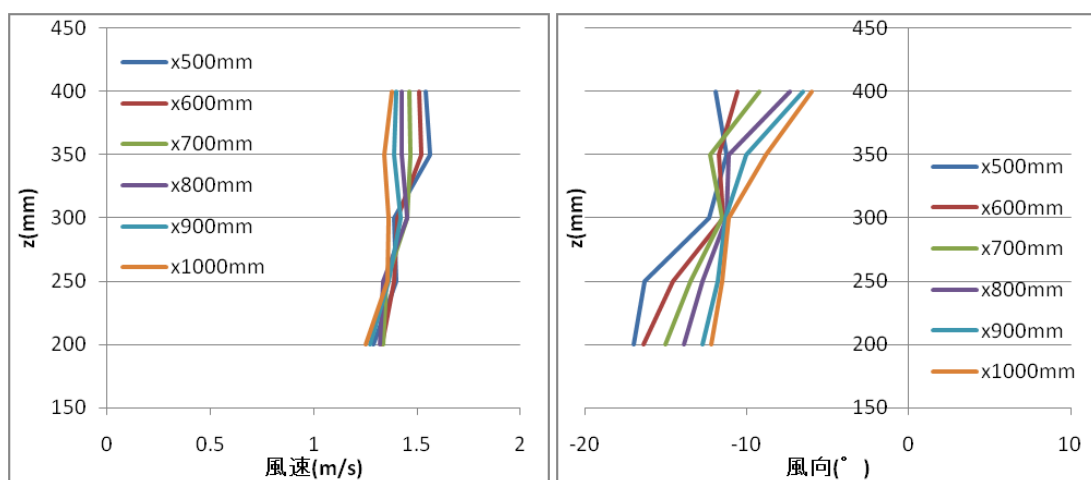


図 3.26 4v 入力_middle8 の平均風速・風向鉛直分布

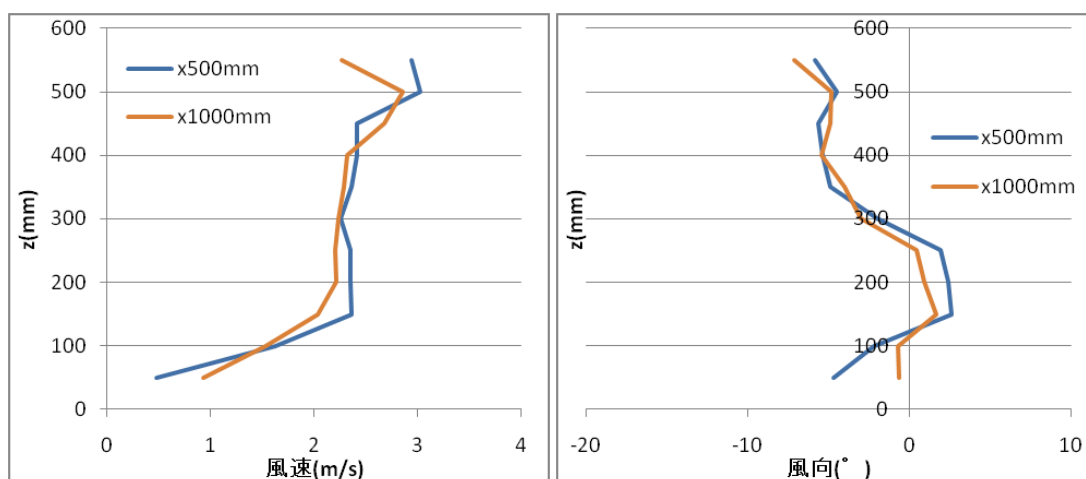


図 3.27 2v 入力_middle9 の平均風速・風向鉛直分布

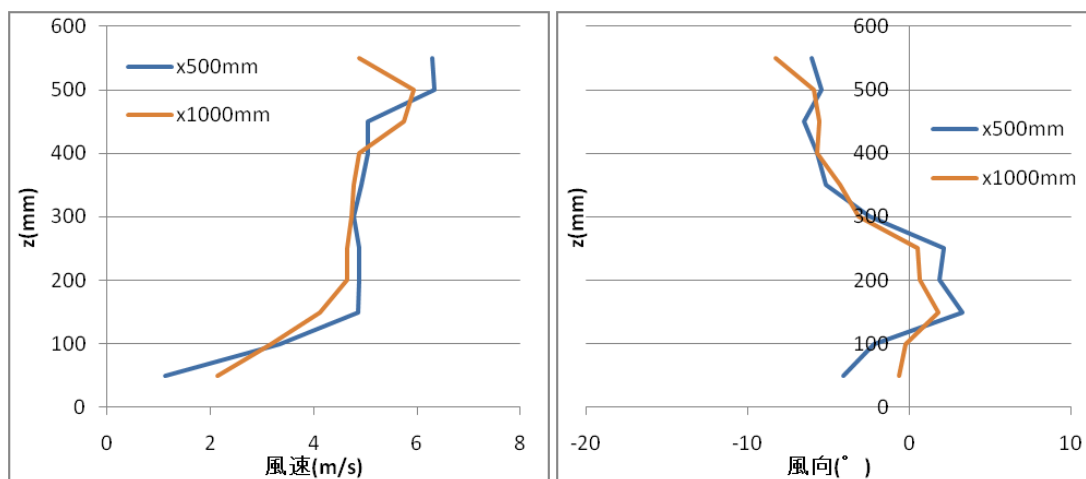


図 3.28 4v 入力_middle9 の平均風速・風向鉛直分布

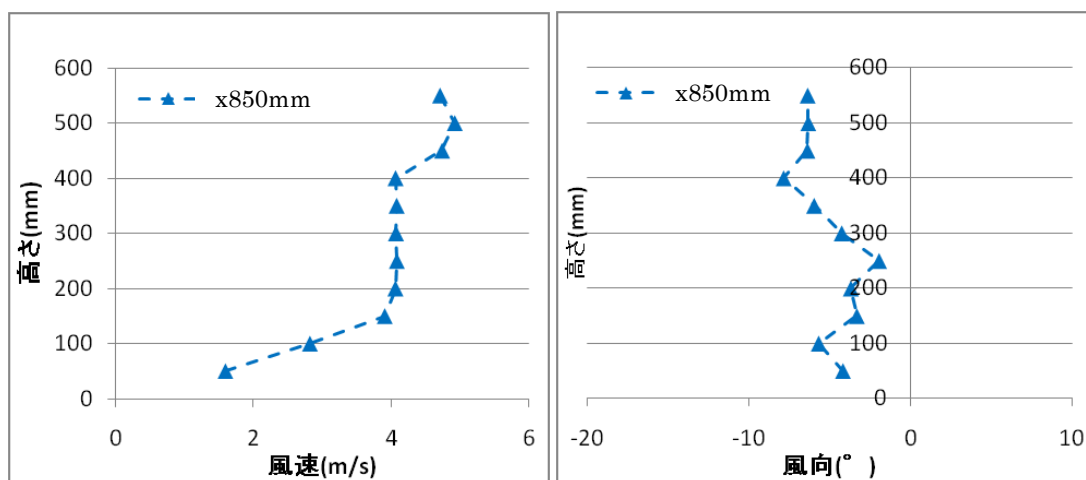


図 3.29 1列複数ファン風洞における平均風速・風向鉛直分布

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 3.4 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 $Vlt_0=4$ の入力のもものは 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 3.28、図 3.29 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。

3.4.2 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 3.4 から表 3.6 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、 $Vlt_0=4$ 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 3.30 から図 3.32 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 3.4 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

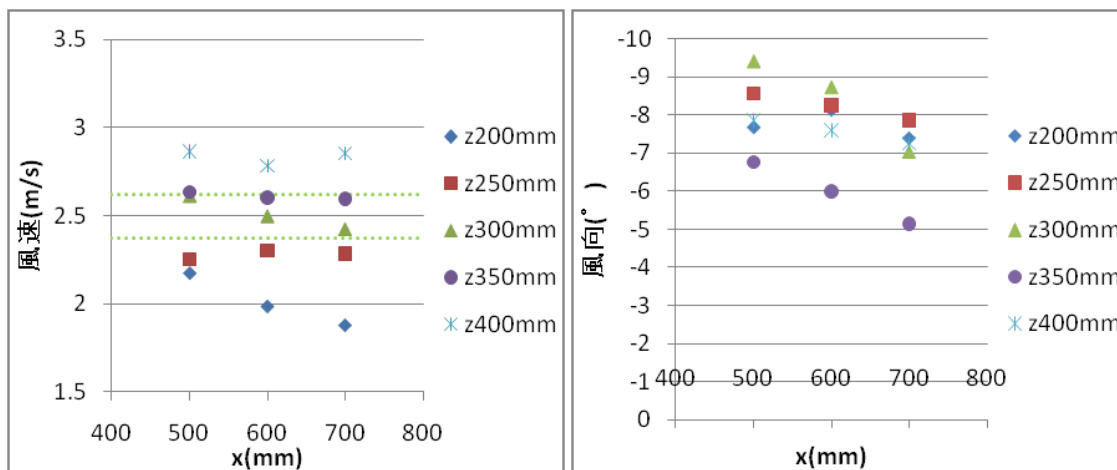
表 3.5 middle5 を元に調整した各ケースの入力電圧

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 3.6 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)

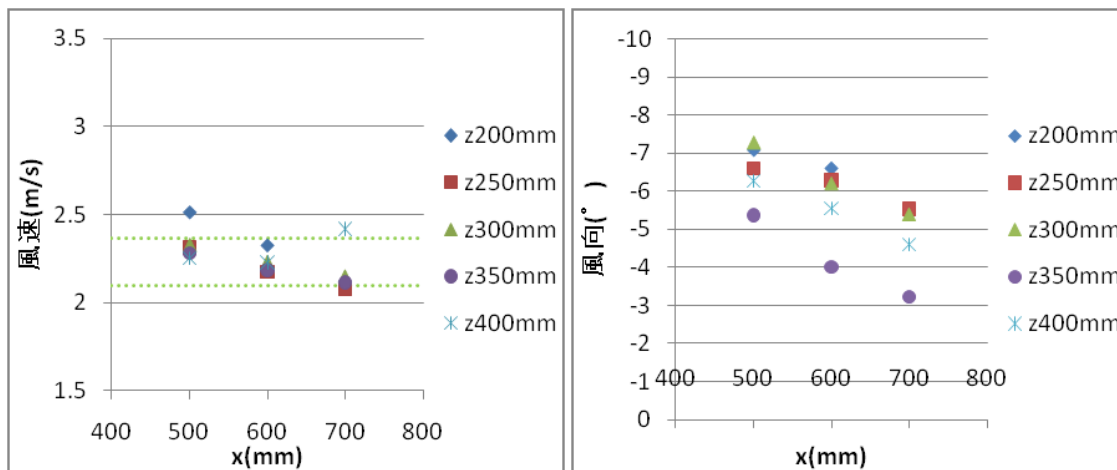
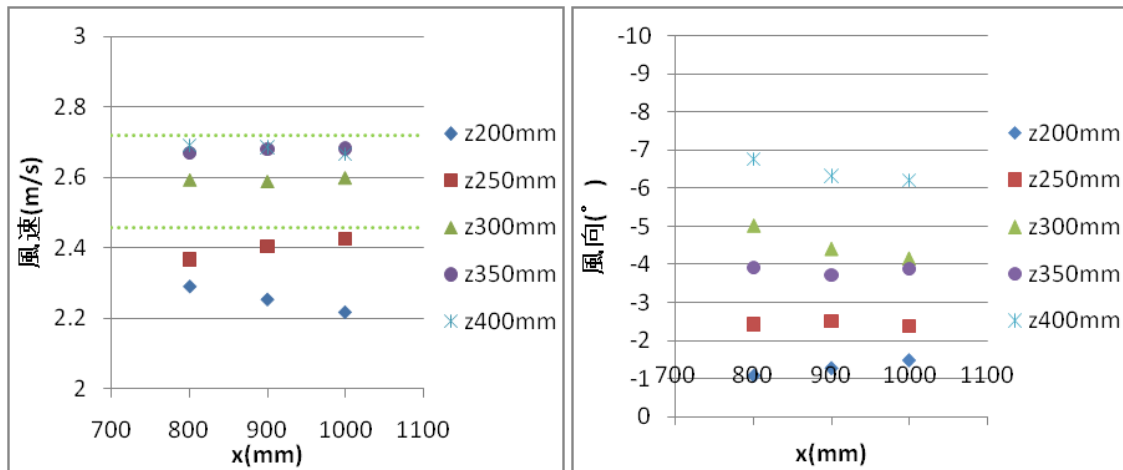


図 3.30 middle3 の風速・風向分布

調整前(middle5)



調整後(middle5_5)

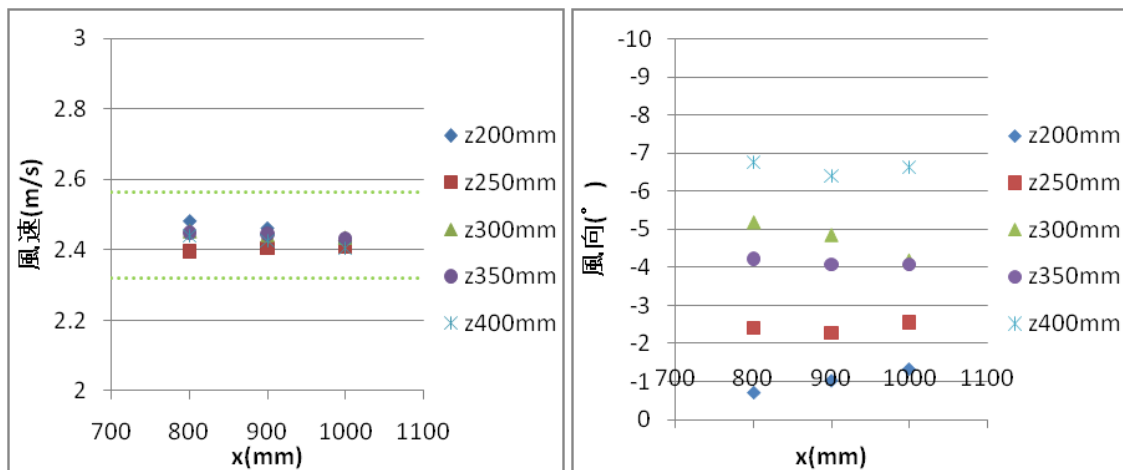
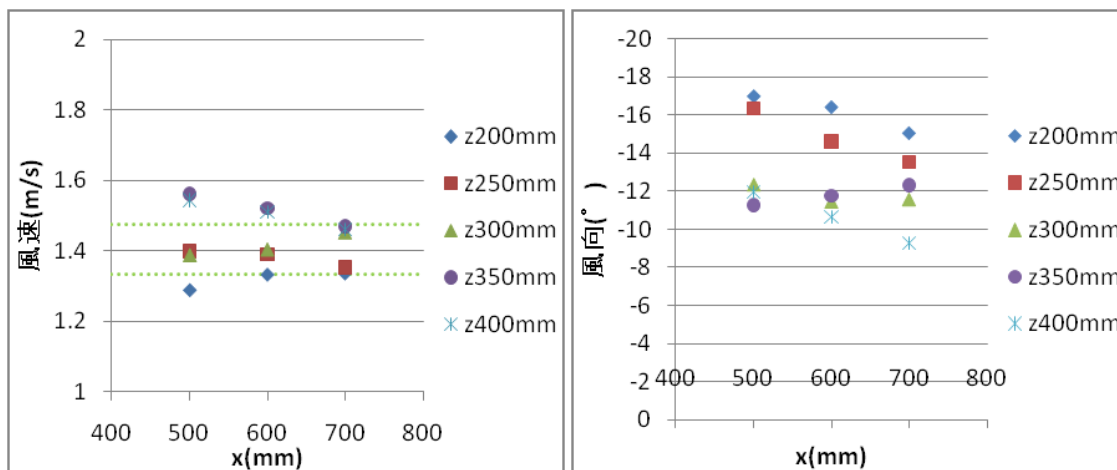


図 3.31 middle5 の風速・風向分布

調整前(middle8)



調整後(middle8_8)

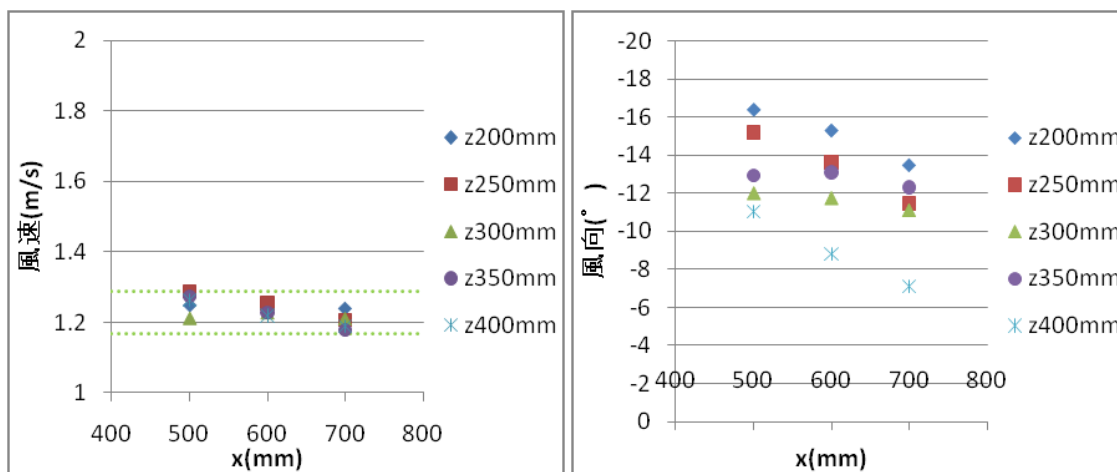


図 3.32 middle8 の風速・風向分布

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^{*3-3}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。

3.5 非定常風向変化気流の作成

3.5.1 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 3.7 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 3.7 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

3.5.2 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 $Vlto$ 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 3.33** から **図 3.44** 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。

なお、他の結果については付録 3 にまとめてある。

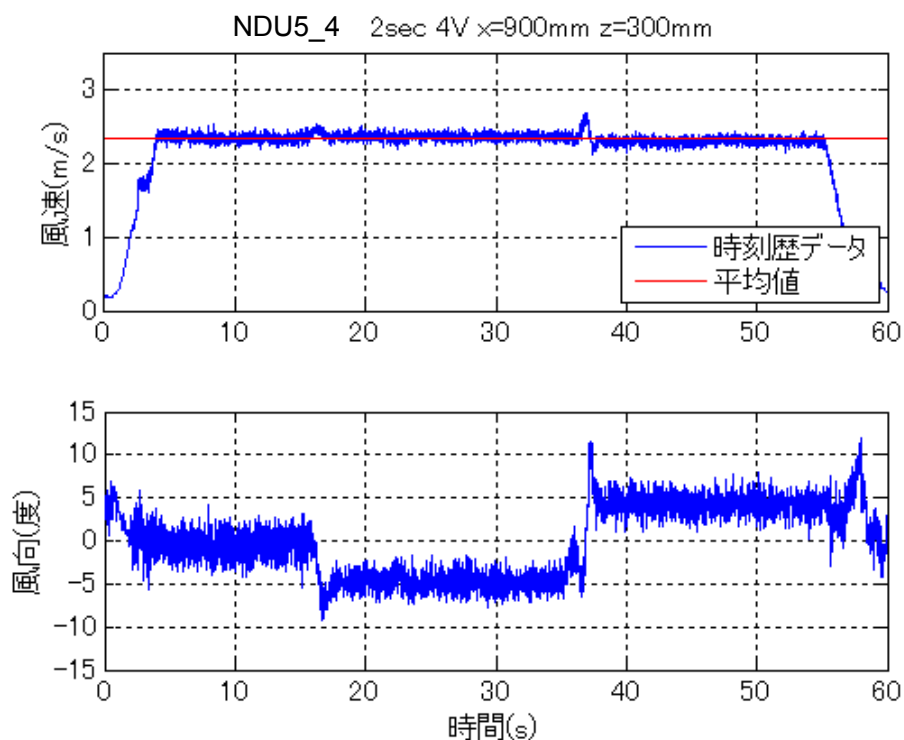


図 3.33 NDU5 で 2 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

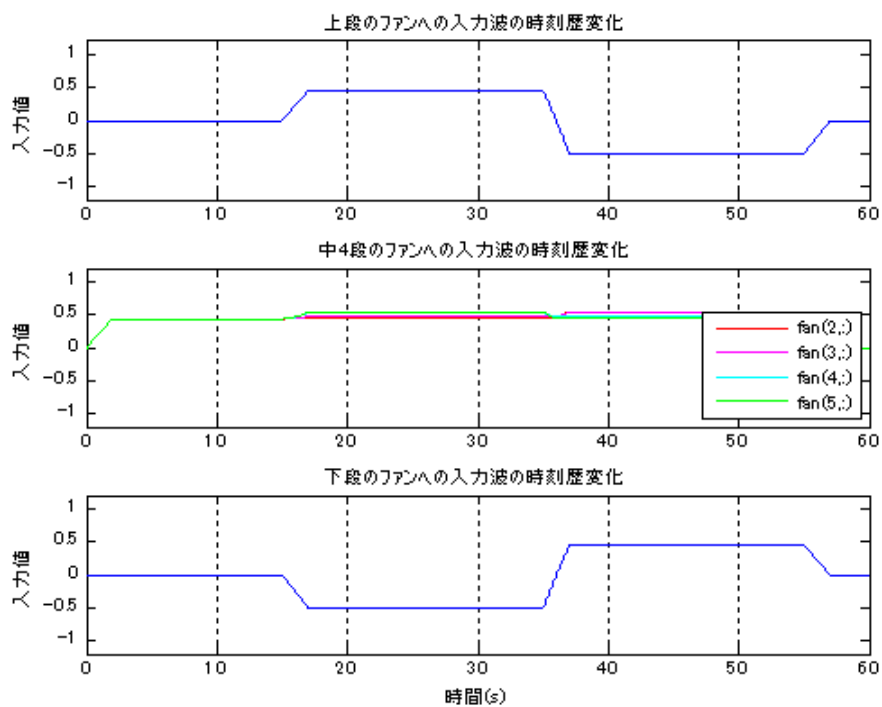


図 3.34 NDU5 で 2 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

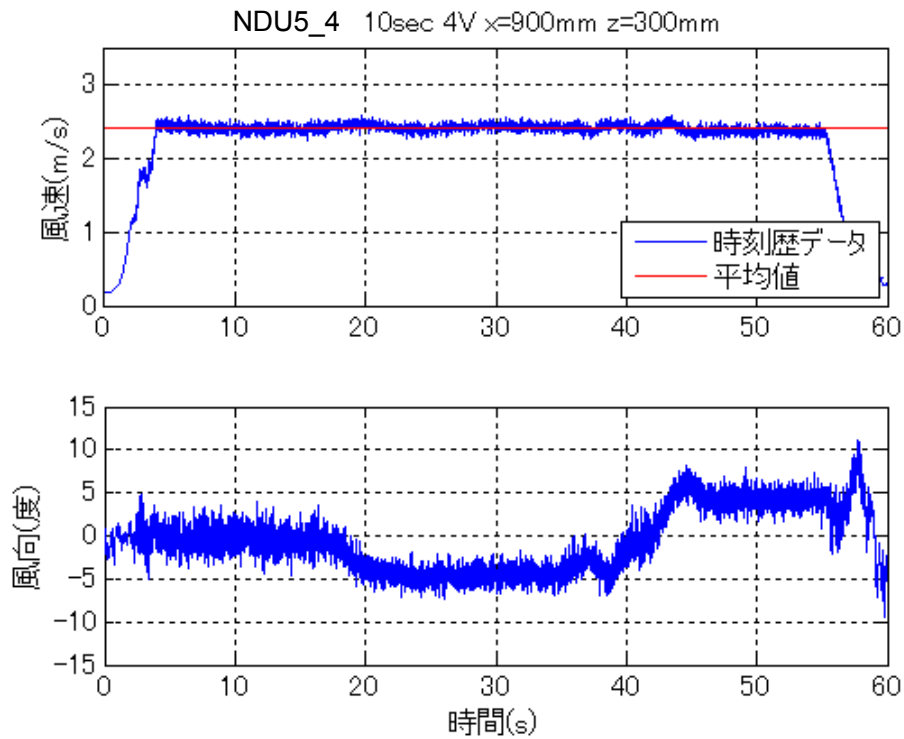


図 3.35 NDU5 で 10 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

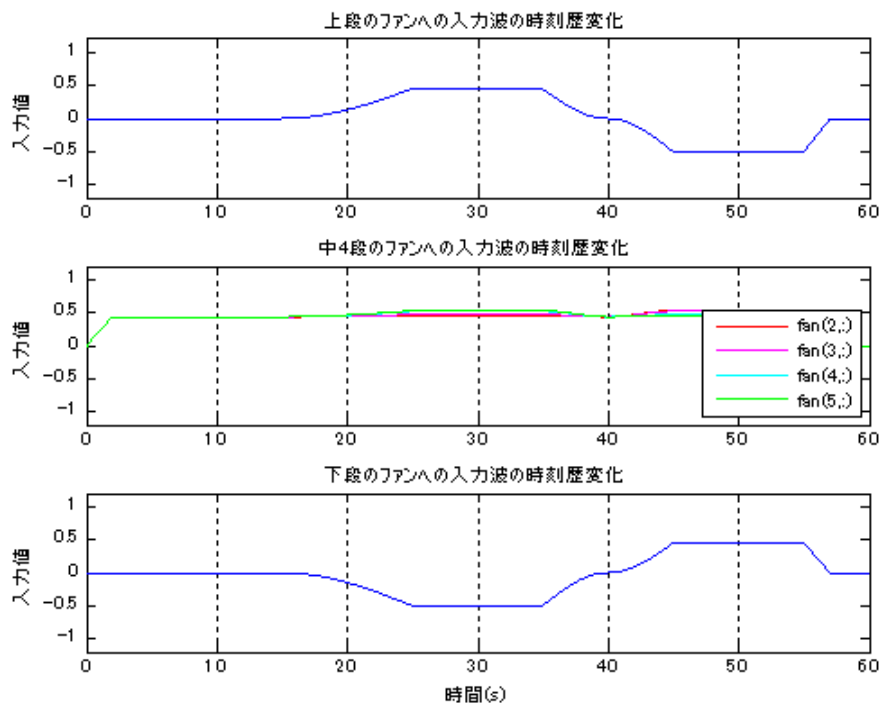


図 3.36 NDU5 で 10 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

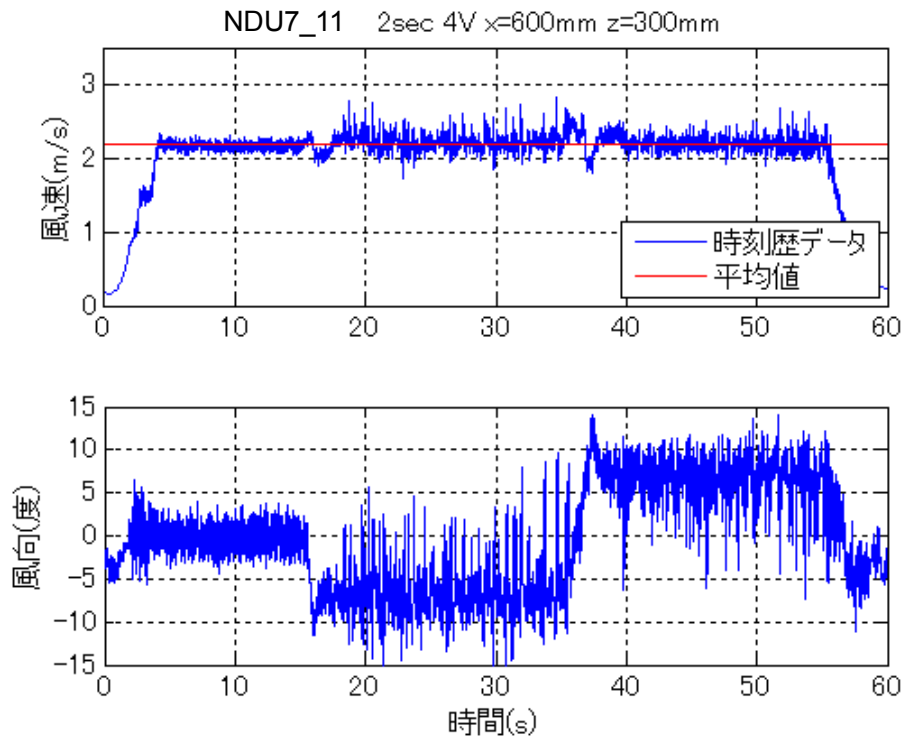


図 3.37 NDU7 で 2 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

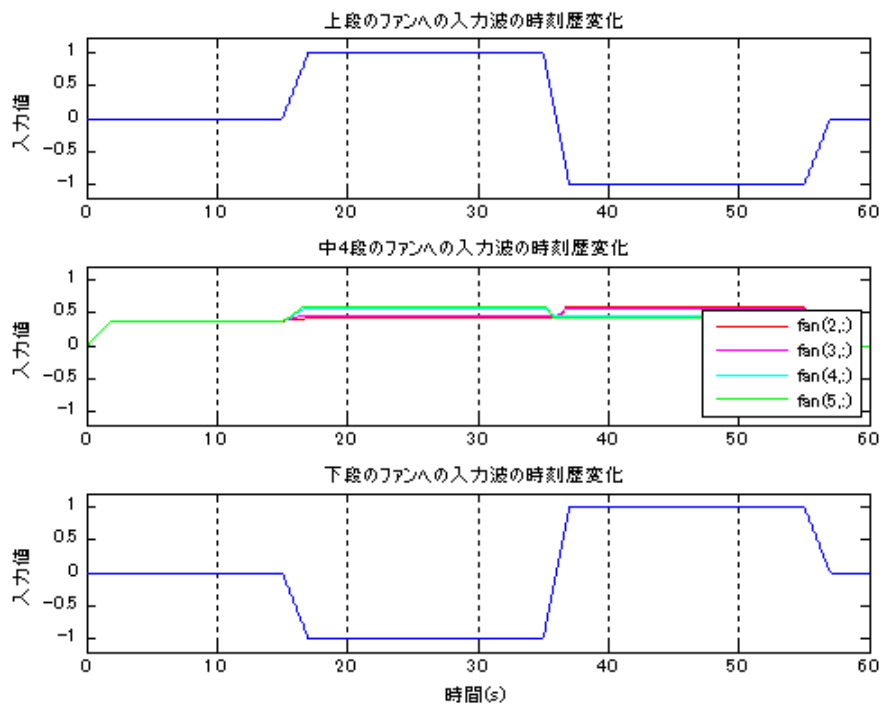


図 3.38 NDU7 で 2 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

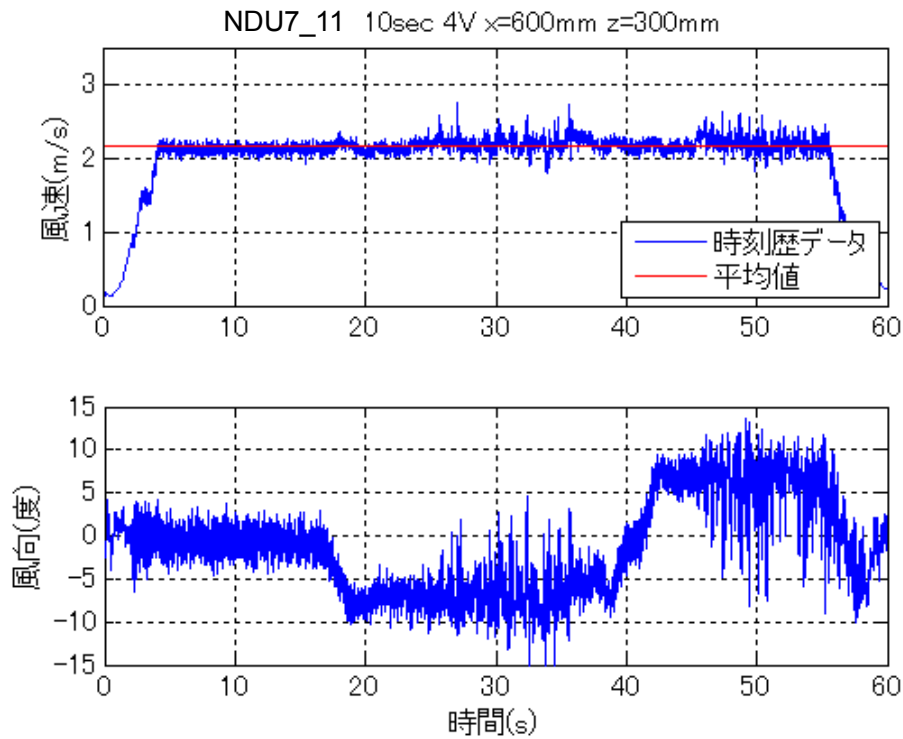


図 3.39 NDU7 で 10 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

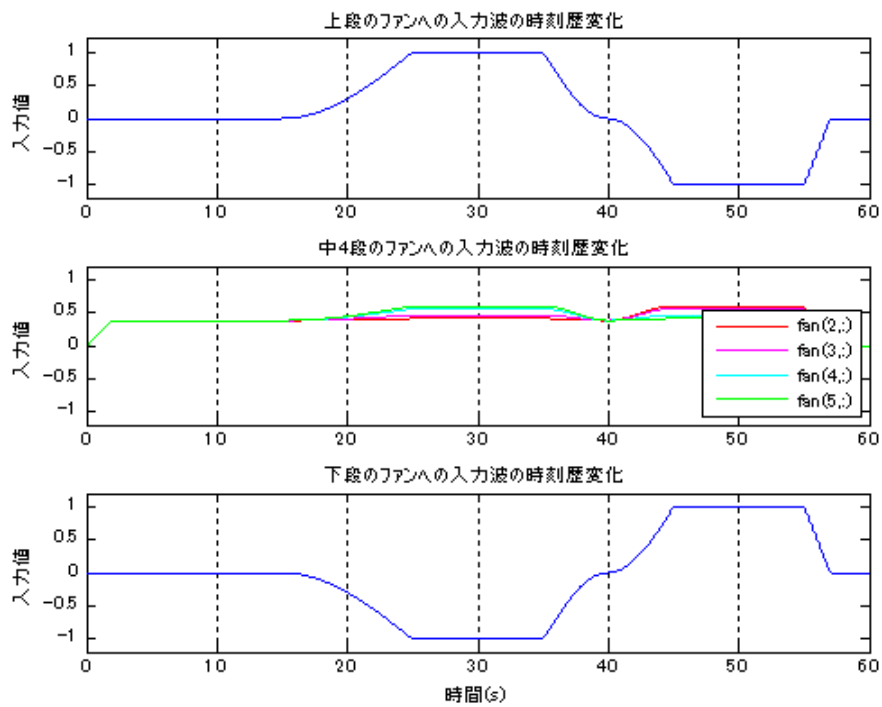


図 3.40 NDU7 で 10 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

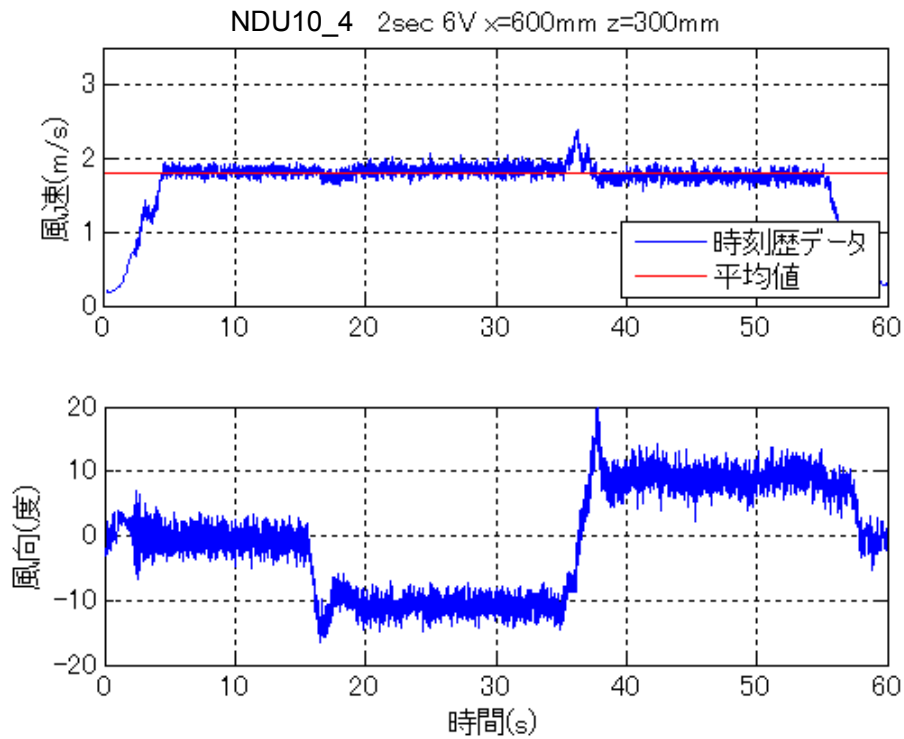


図 3.41 NDU10 で 2 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

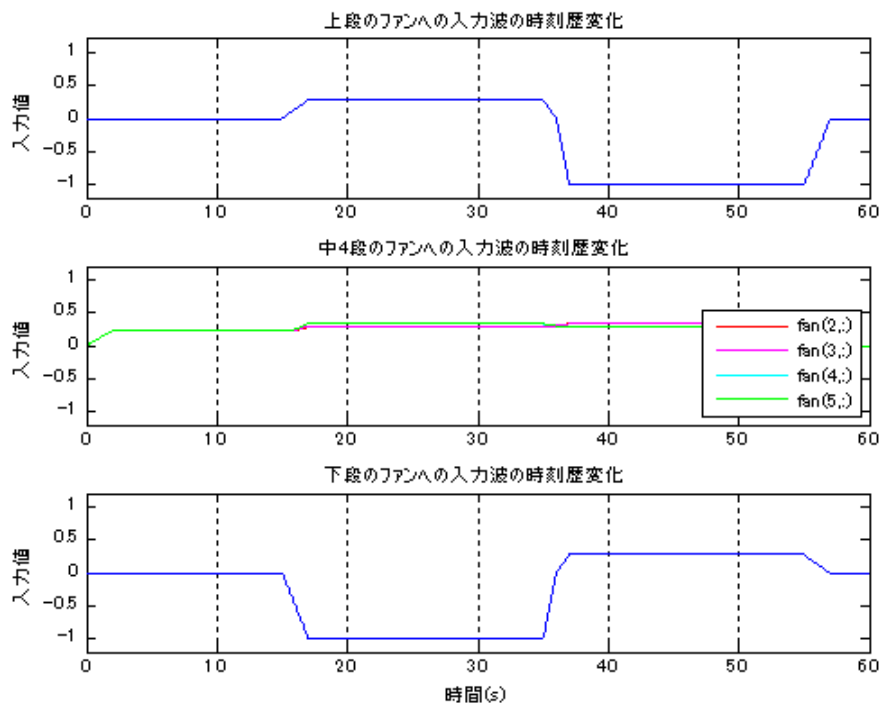


図 3.42 NDU10 で 2 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

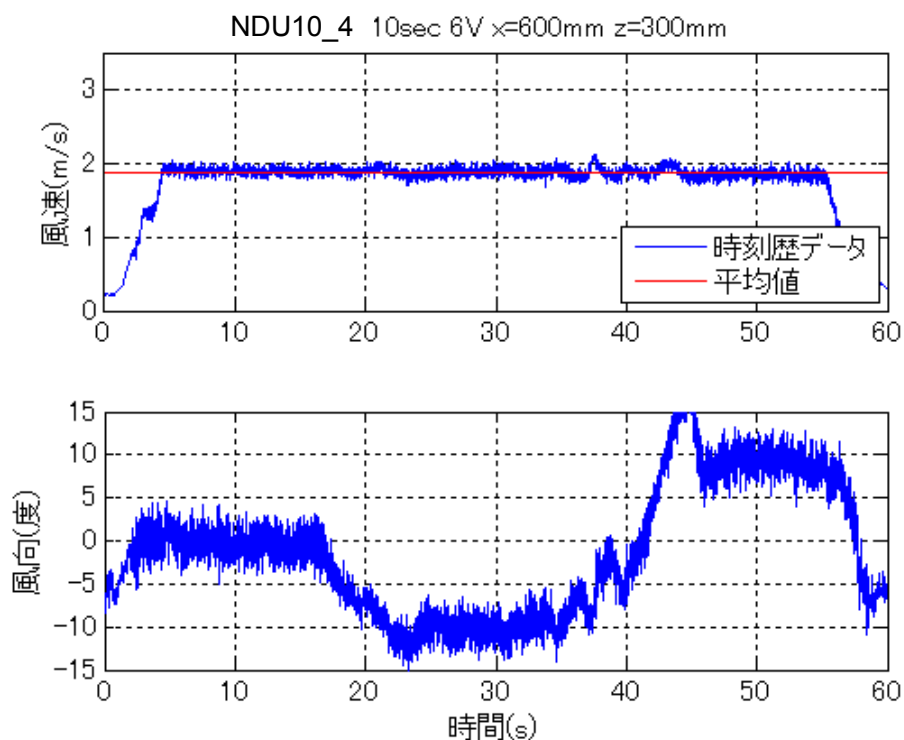


図 3.43 NDU10 で 10 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

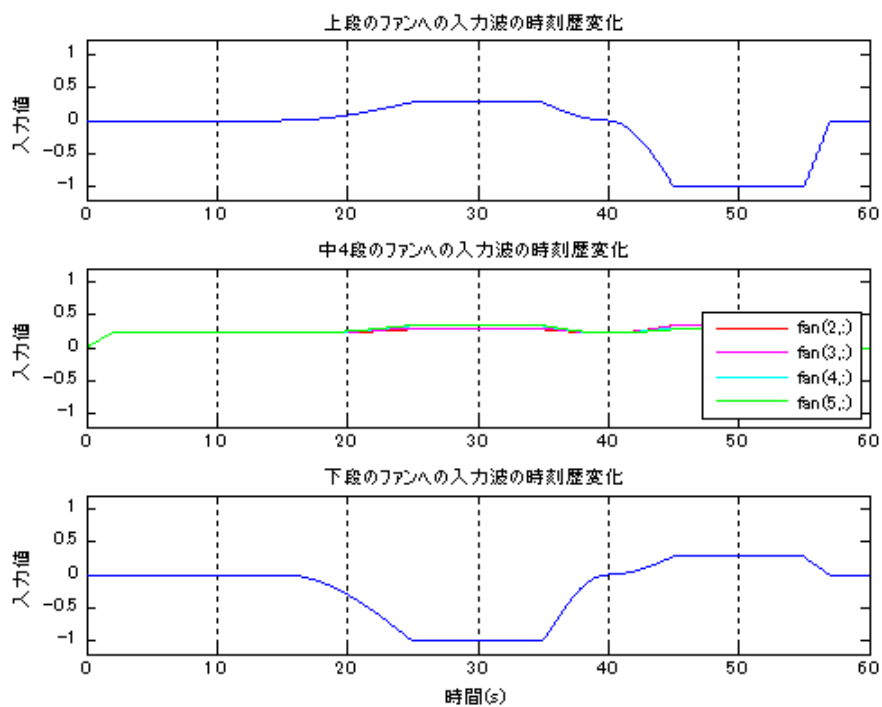


図 3.44 NDU10 で 10 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

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3.8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 3.8 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 4 章-

風洞内静圧分布の測定実験

4.1 本章の概要

本来、風圧測定実験においては、4.1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*4-1。

$$p = p' - p_s \quad (4.1)$$

p：測定圧力(Pa)

p'：表面圧力(Pa)

p_s：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*4-2。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4.1)。

しかし、3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3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。

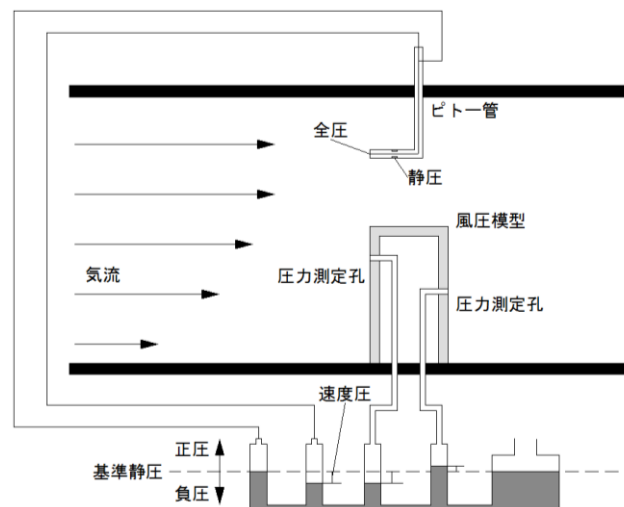


図4.1 一般的な基準圧の在り方

4.2 静圧測定手法

4.2.1 圧力測定機器の概要

圧力測定は図 4.2 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。4.1 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。

$$U(t) = \sqrt{\frac{2 \times (p_0(t) - p_s(t))}{\rho}} \quad (4.2)$$

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 2,3 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。

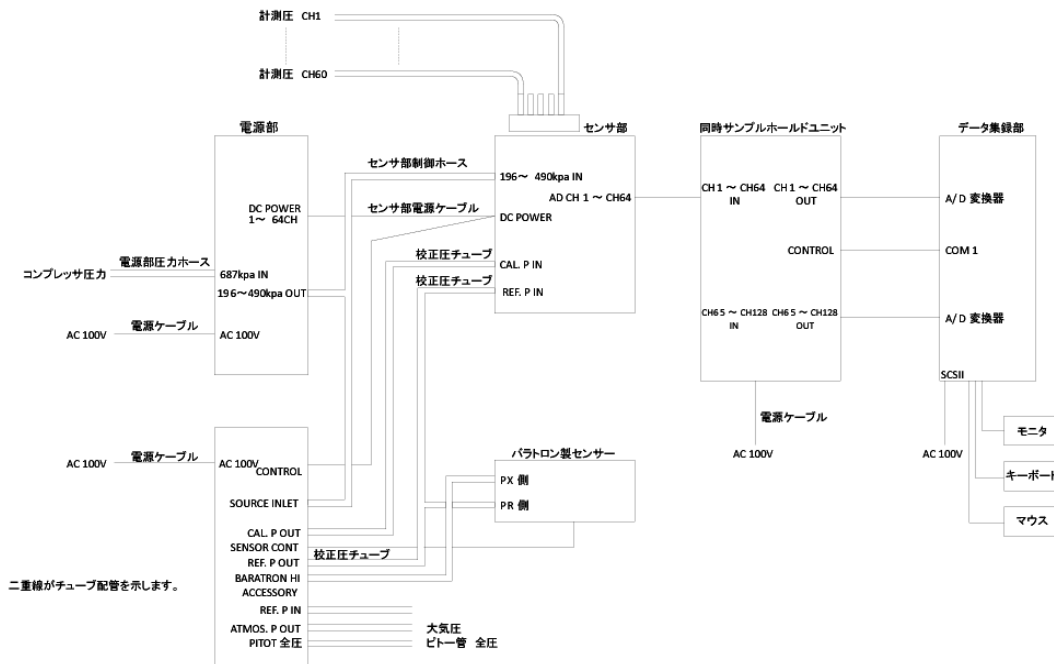


図 4.2 圧力測定システム図

4.2.2 風洞内静圧の測定方法

風洞内の静圧を確認するため、**図 4.3** 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。

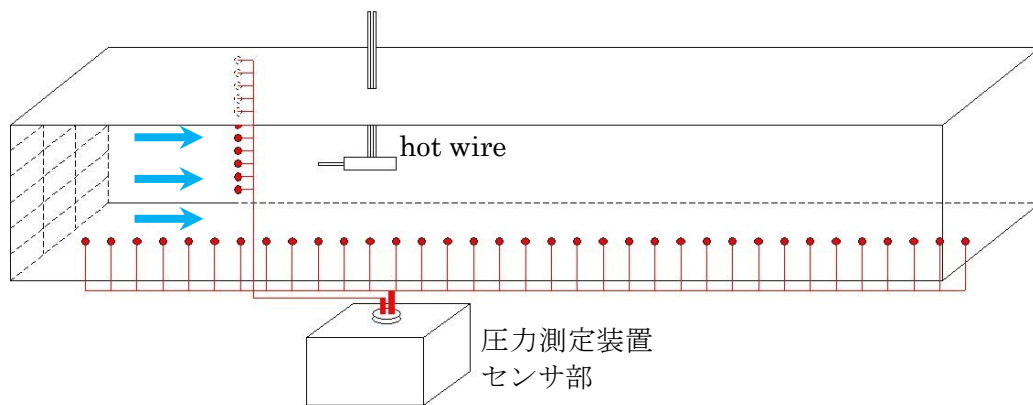


図 4.3 圧力測定孔の設置位置

4.3 風速変化時における風洞内静圧分布

4.3.1 風洞内の静圧分布の確認

前田等の研究⁴⁻³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かける入力、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4.4から図4.27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。

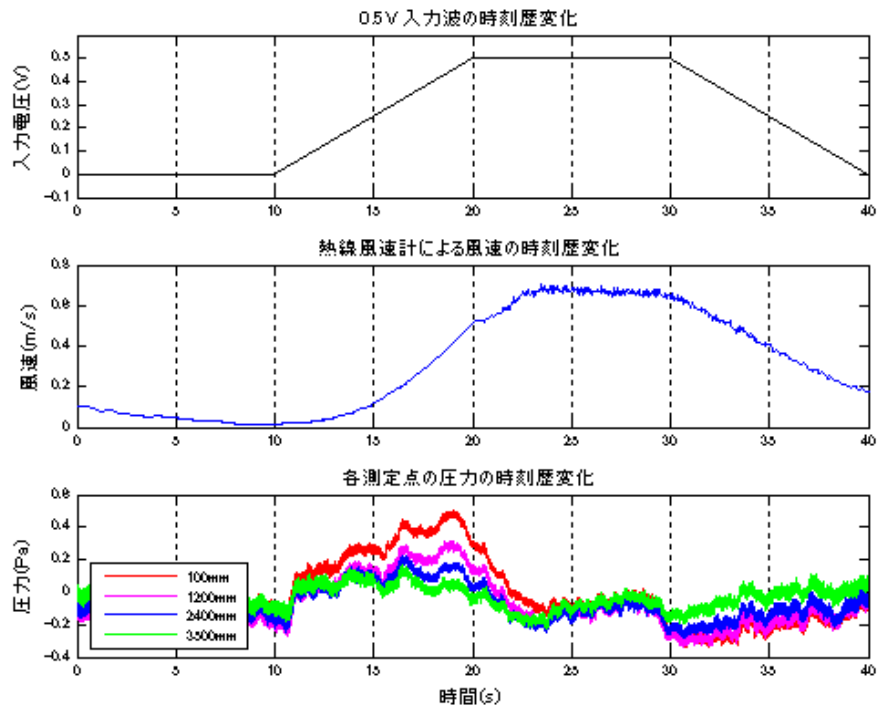


図 4.4 静圧測定結果_0.5v 入力_10 秒変化

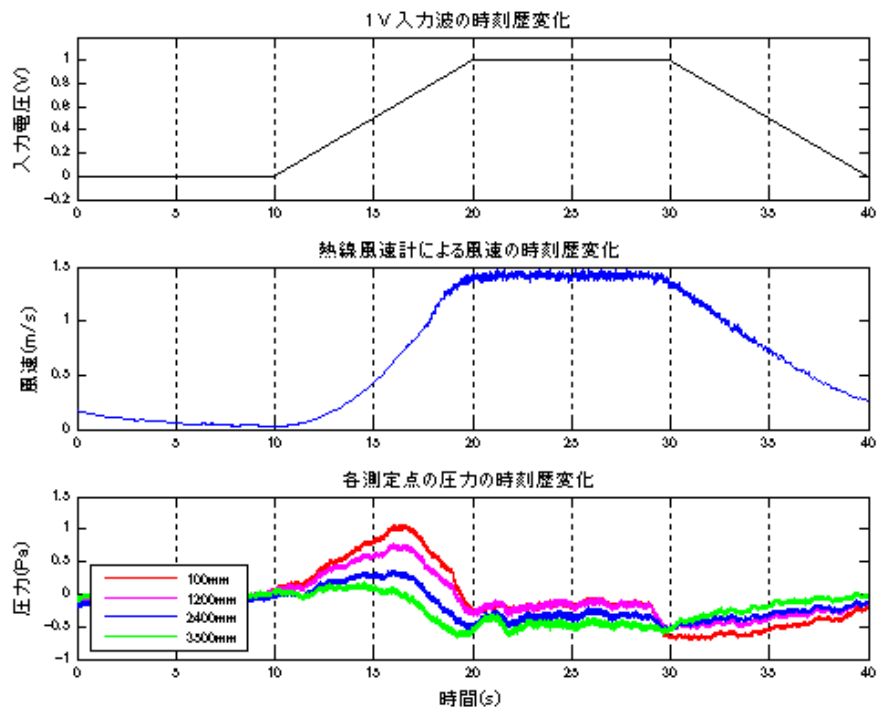


図 4.5 静圧測定結果_1v 入力_10 秒変化

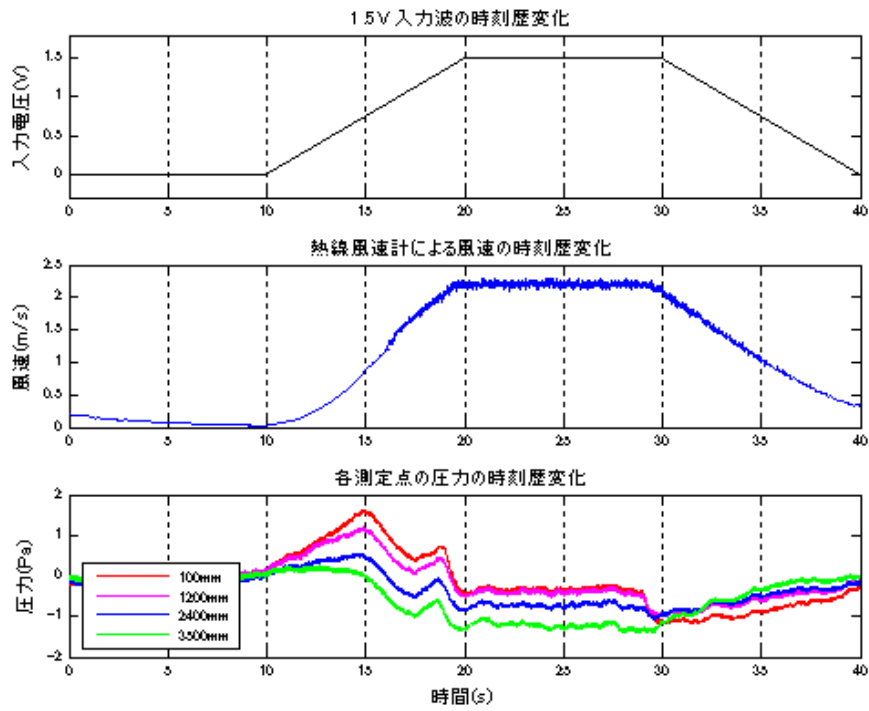


図 4.6 静圧測定結果_1.5v 入力_10 秒変化

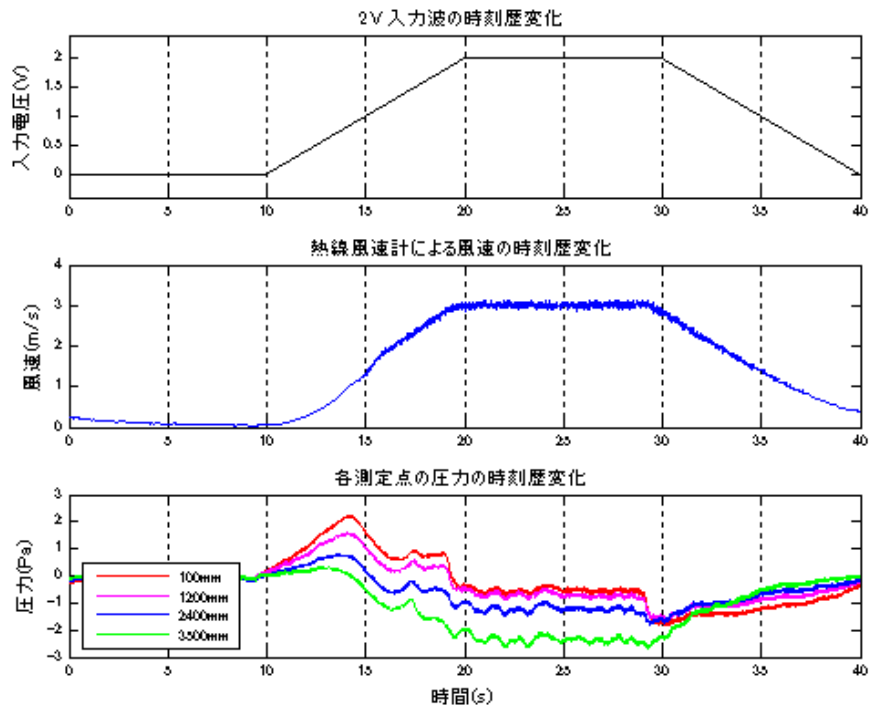


図 4.7 静圧測定結果_2v 入力_10 秒変化

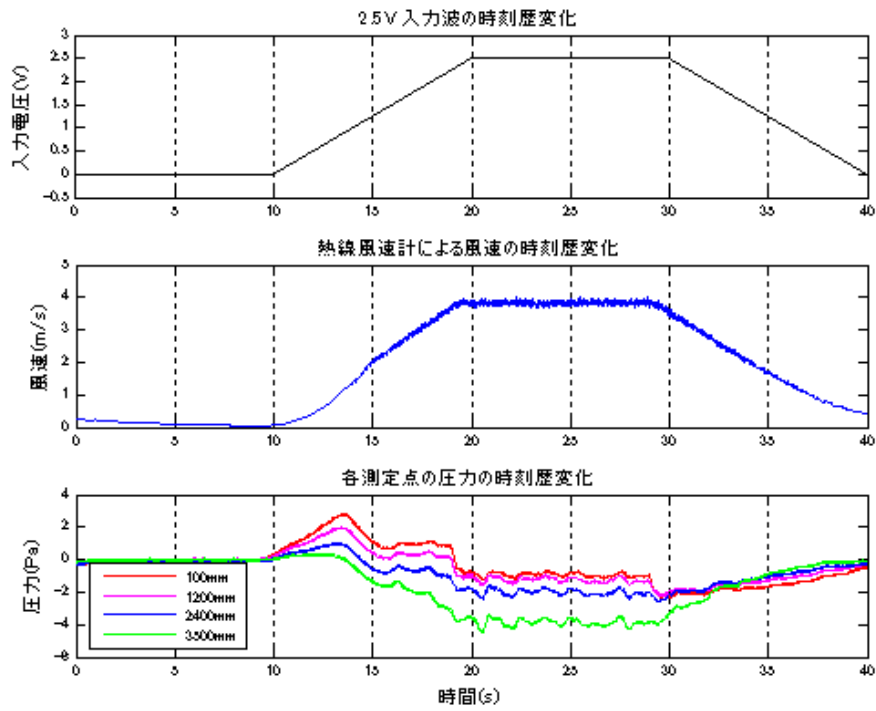


図 4.8 静圧測定結果_2.5v 入力_10 秒変化

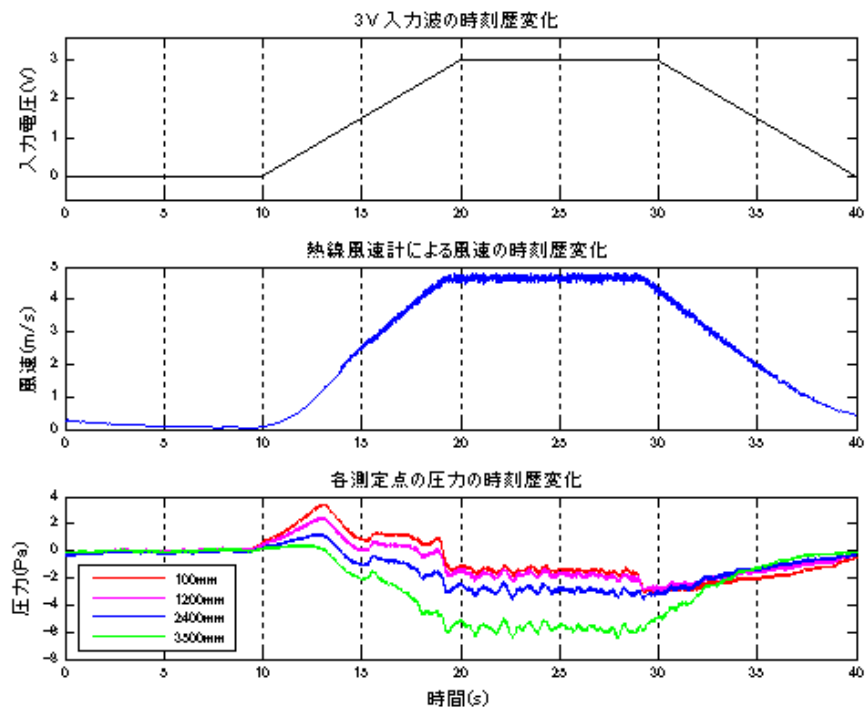


図 4.9 静圧測定結果_3v 入力_10 秒変化

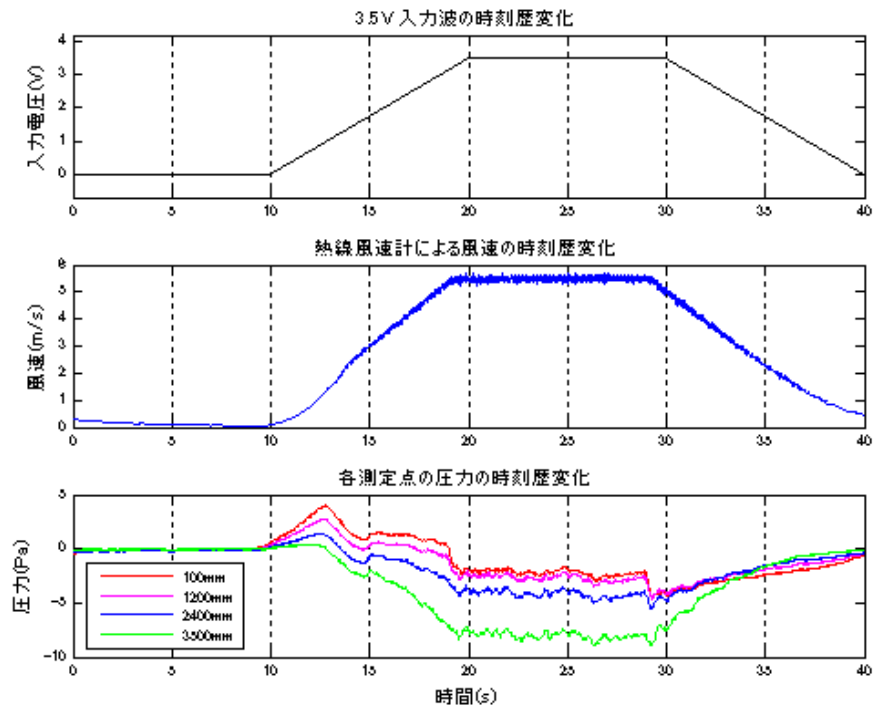


図 4.10 静圧測定結果_3.5v 入力_10 秒変化

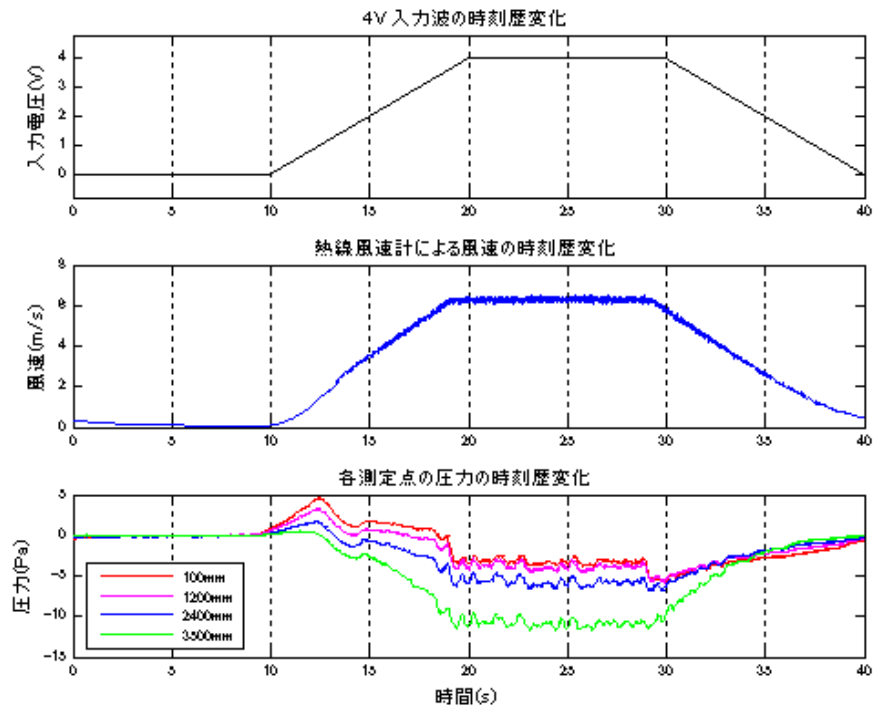


図 4.11 静圧測定結果_4v 入力_10 秒変化

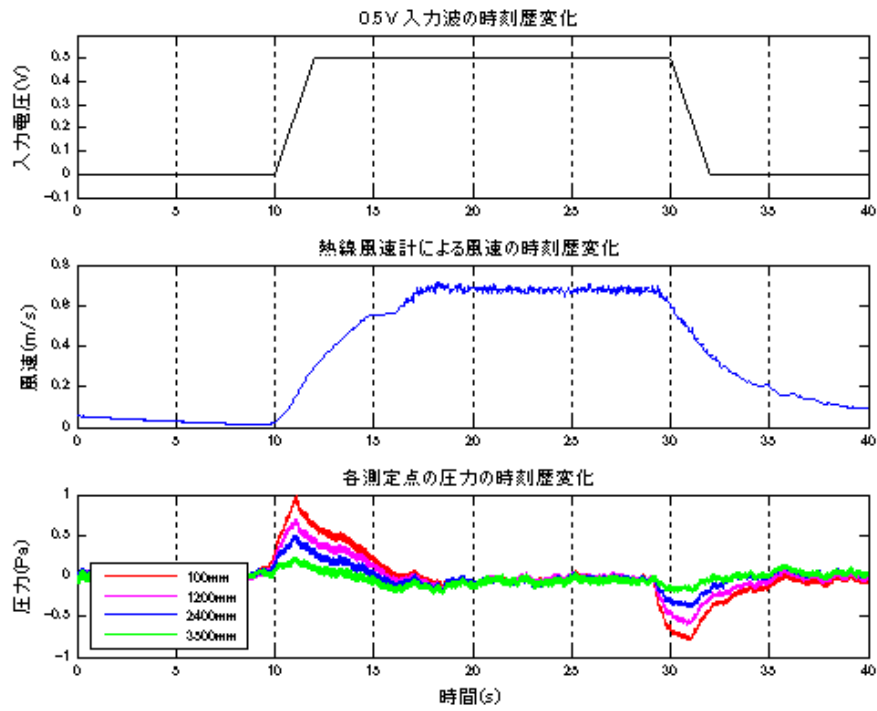


図 4.12 静圧測定結果_0.5v 入力_2 秒変化

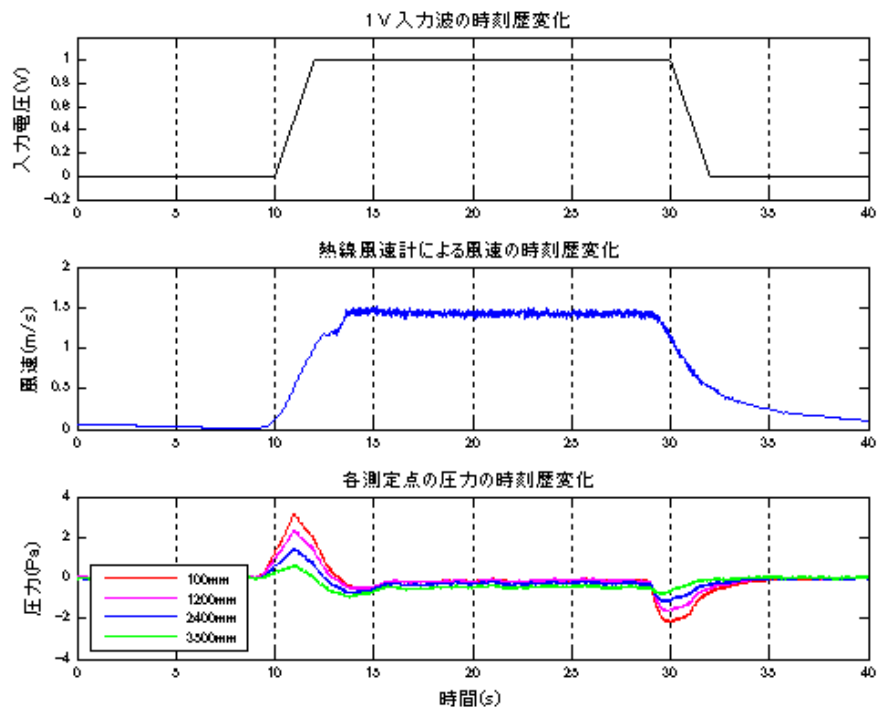


図 4.13 静圧測定結果_1v 入力_2 秒変化

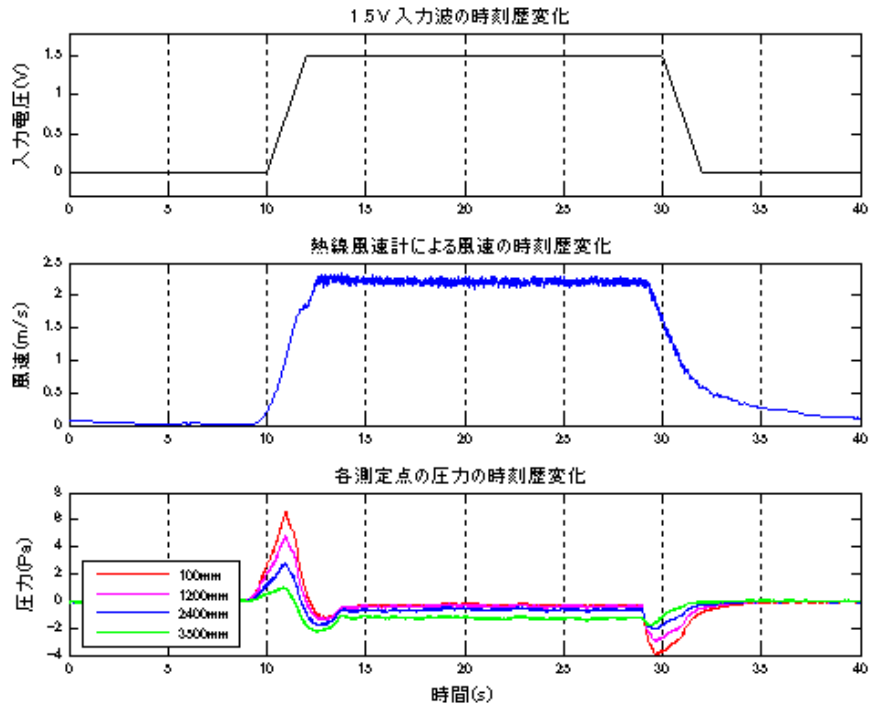


図 4.14 静圧測定結果_1.5v 入力_2 秒変化

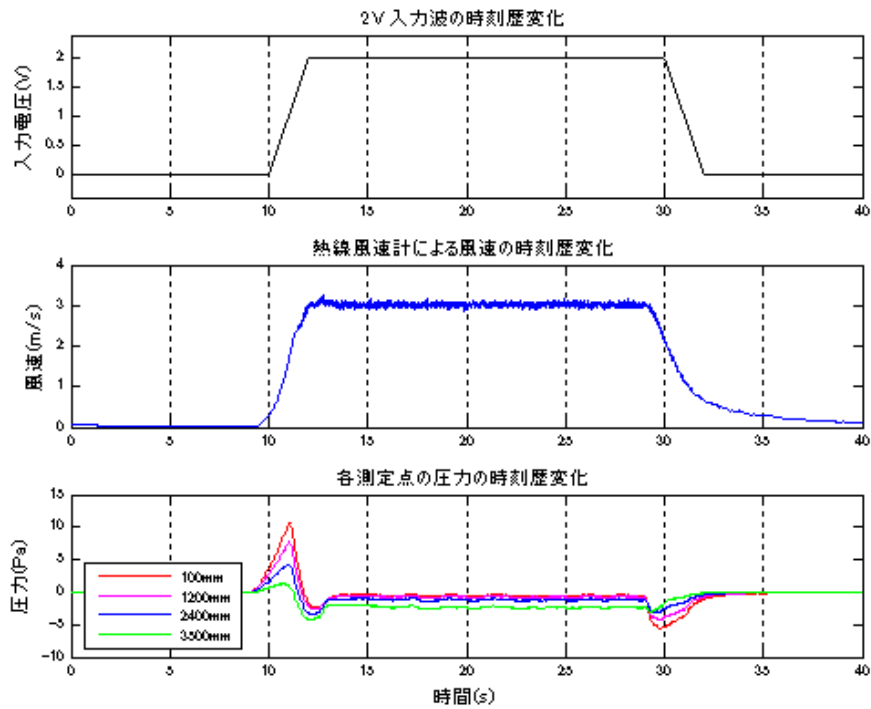


図 4.15 静圧測定結果_2v 入力_2 秒変化

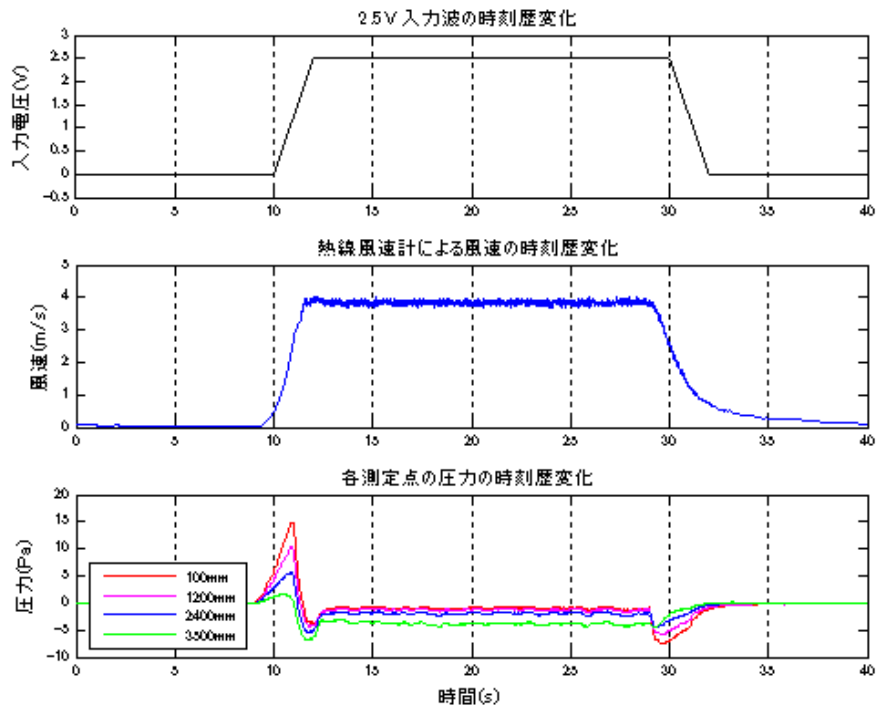


図 4.16 静圧測定結果_2.5v 入力_2 秒変化

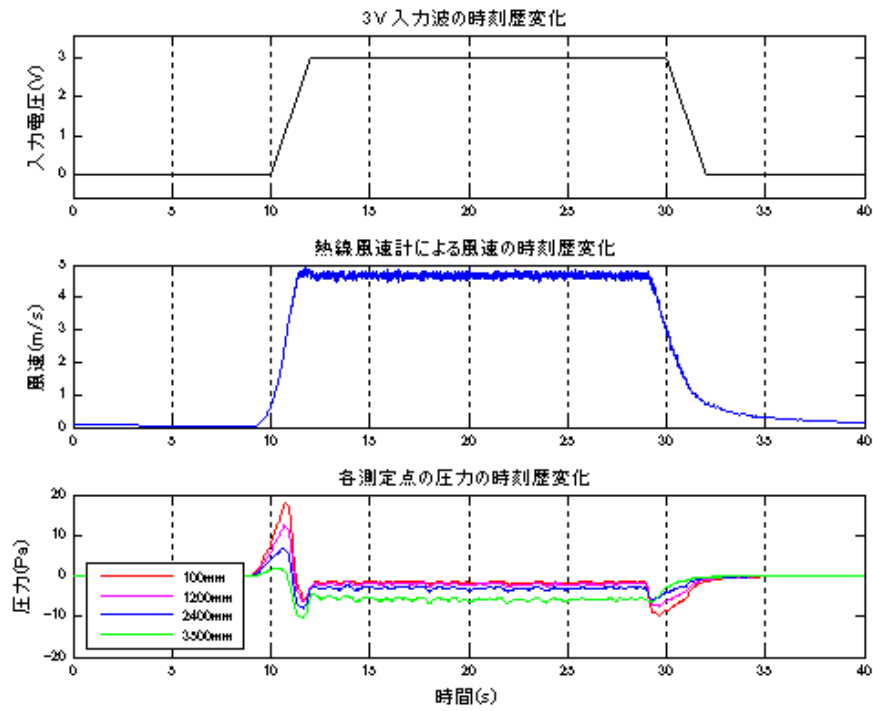


図 4.17 静圧測定結果_3v 入力_2 秒変化

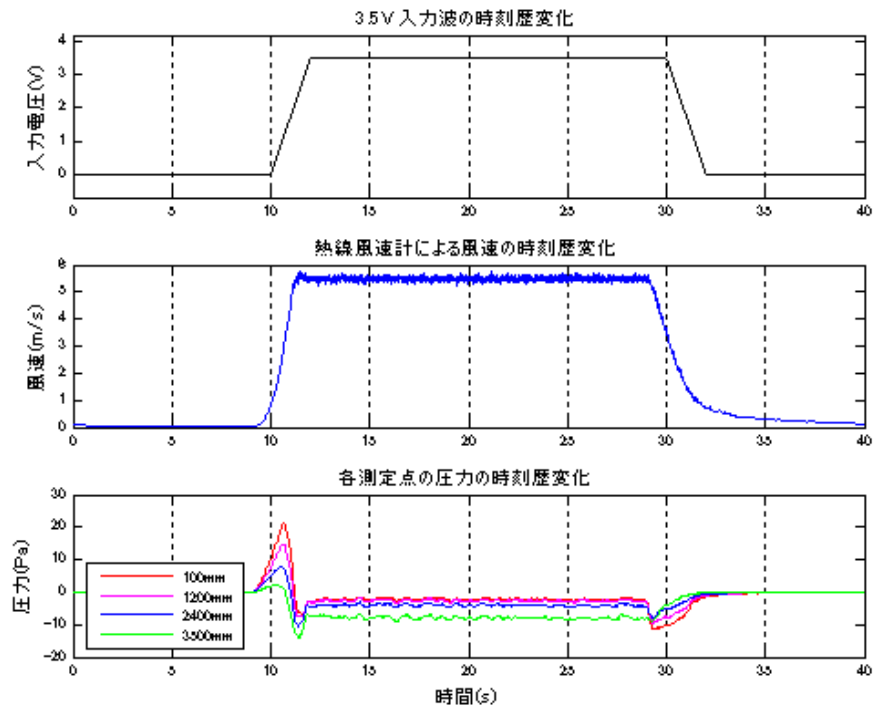


図 4.18 静圧測定結果_3.5v 入力_2 秒変化

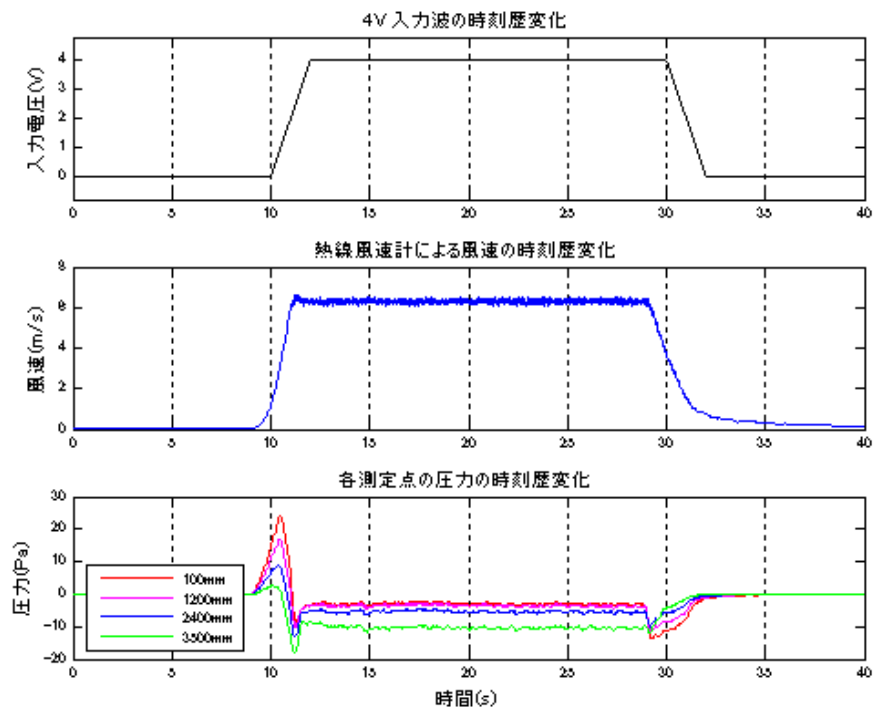


図 4.19 静圧測定結果_4v 入力_2 秒変化

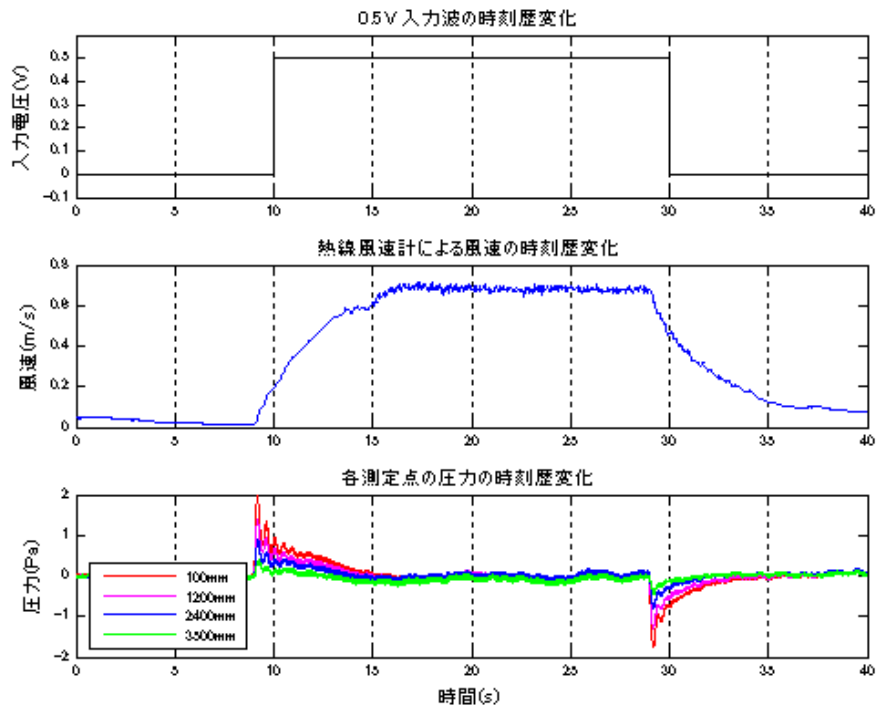


図 4.20 静圧測定結果_0.5v 入力_0 秒変化

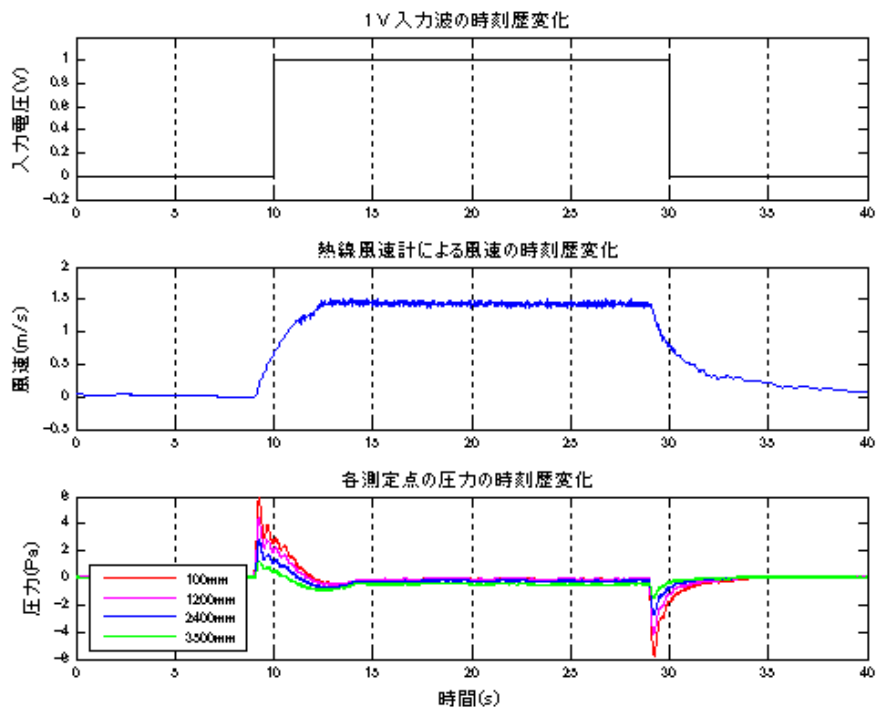


図 4.21 静圧測定結果_1v 入力_0 秒変化

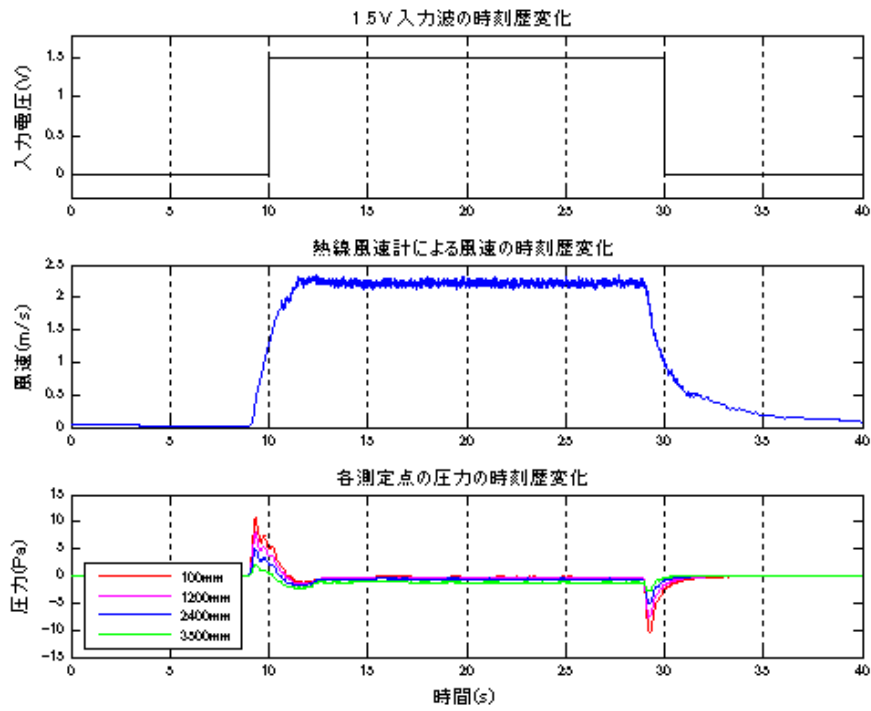


図 4.22 静圧測定結果_1.5v 入力_0 秒変化

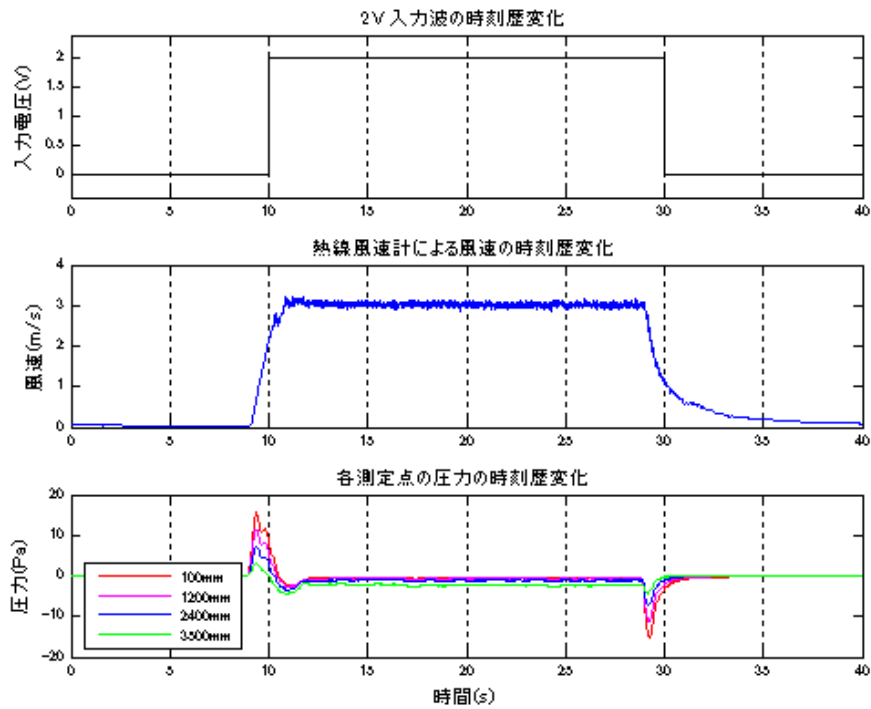


図 4.23 静圧測定結果_2v 入力_0 秒変化

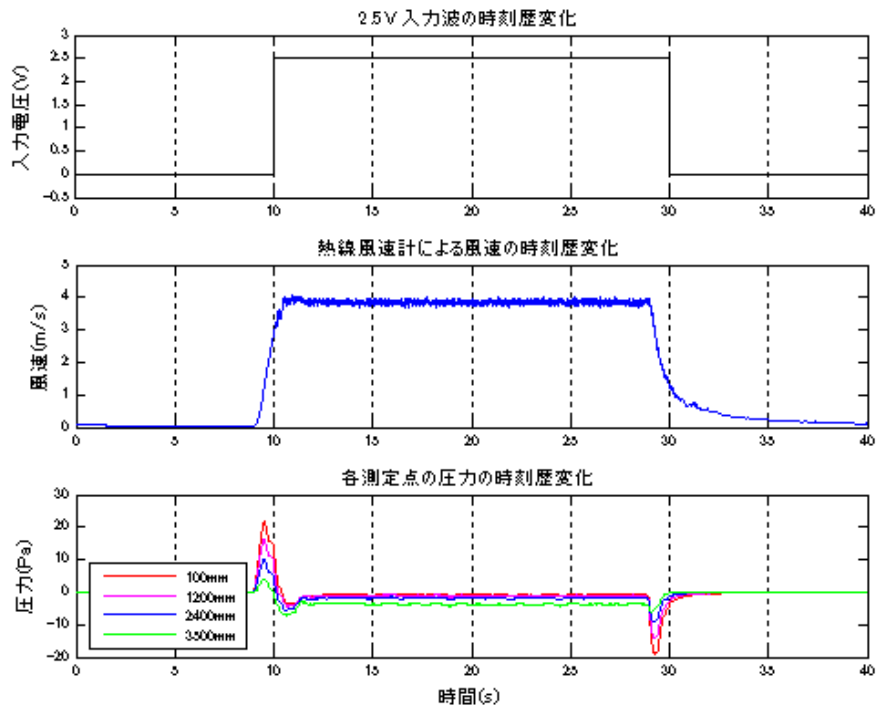


図 4.24 静圧測定結果_2.5v 入力_0 秒変化

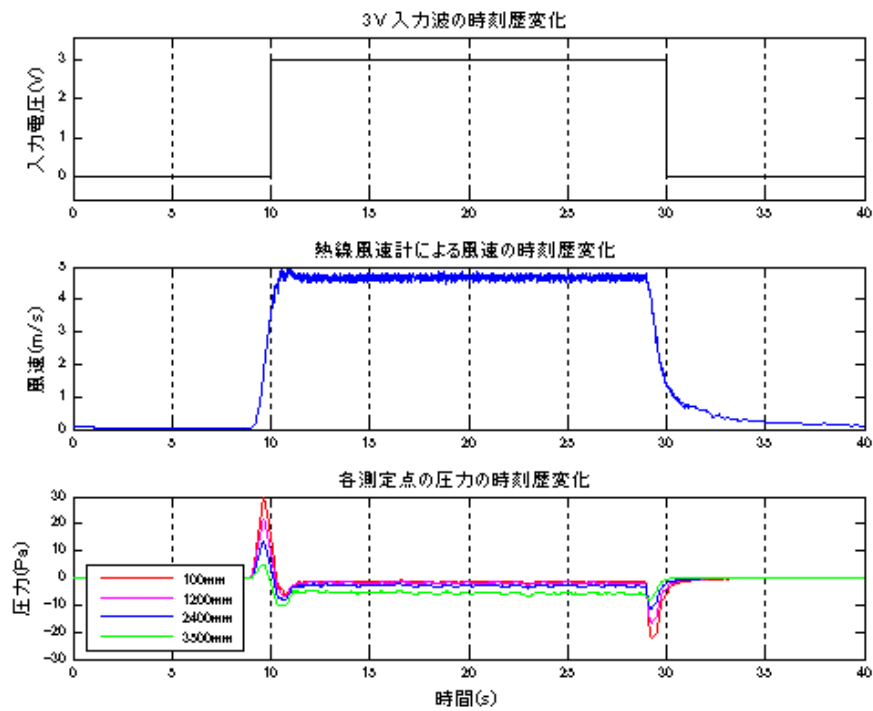


図 4.25 静圧測定結果_3v 入力_0 秒変化

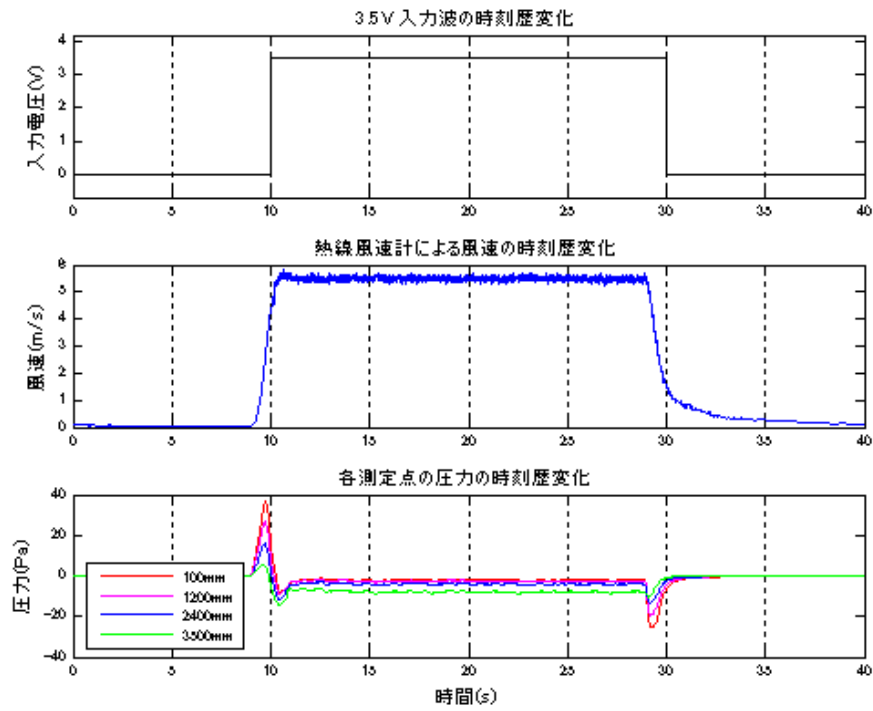


図 4.26 静圧測定結果_3.5v 入力_0 秒変化

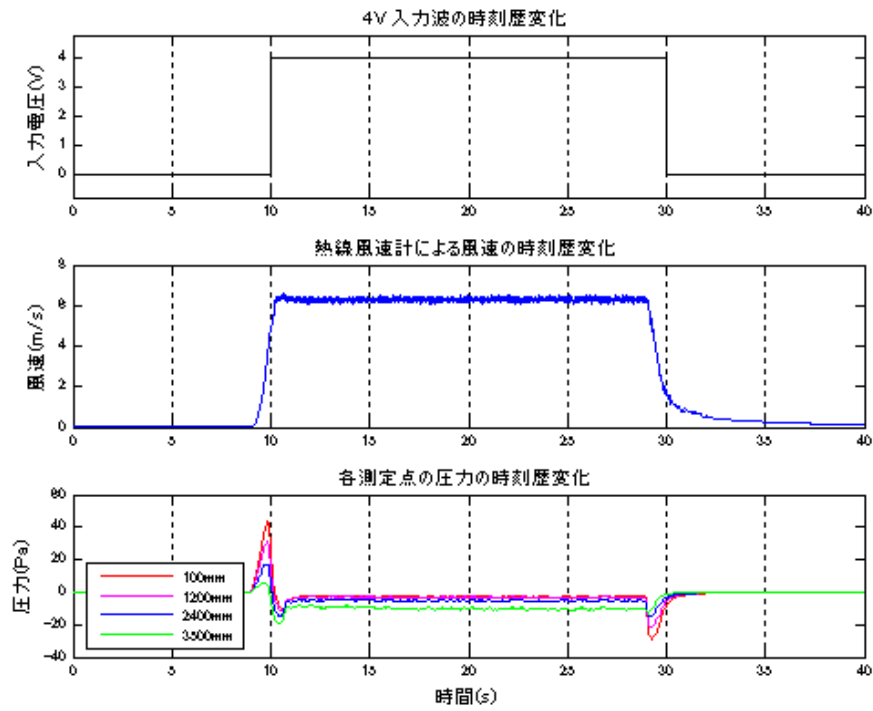


図 4.27 静圧測定結果_4v 入力_0 秒変化

4.3.2 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 4.4 から図 4.27 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 4.28 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 4.29 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

$$q_H = \frac{1}{2} \rho U_R^2 \quad (4.3)$$

q_H ：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。

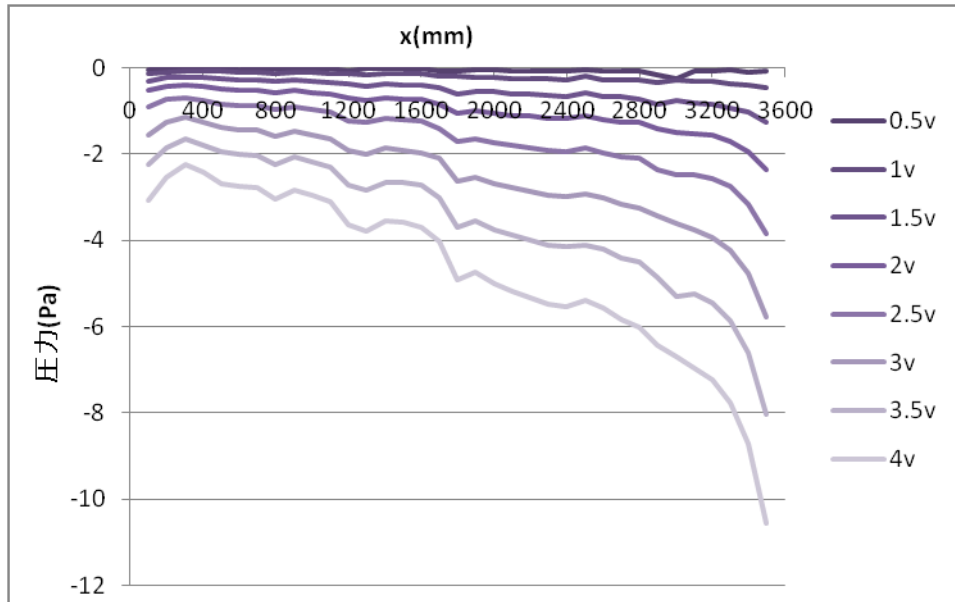


図 4.28 測定位置と静圧の関係

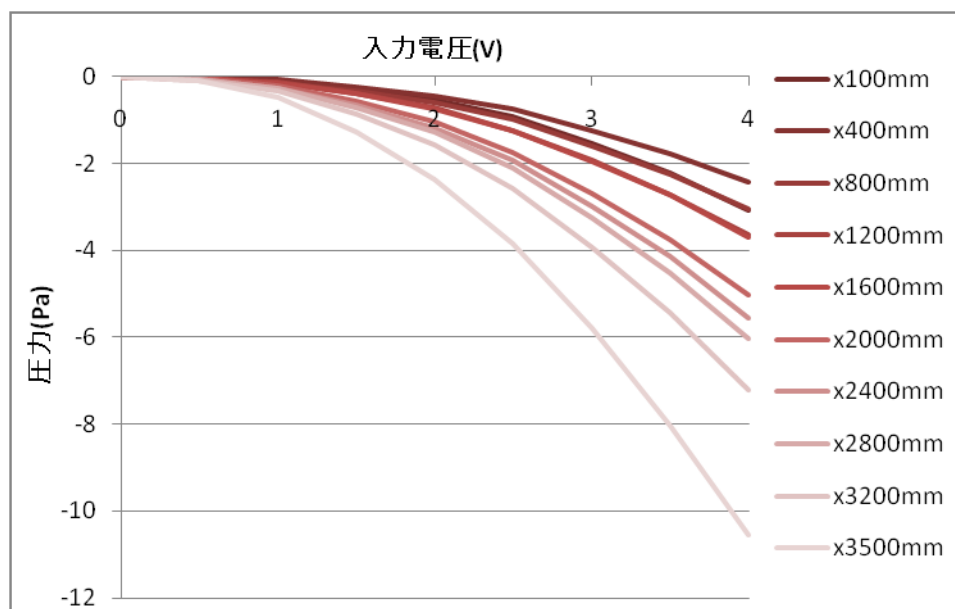


図 4.29 入力電圧と静圧の関係

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 4.30 と図 4.31 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 4.32 と図 4.33 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、4.3 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 4.34 と図 4.35 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。

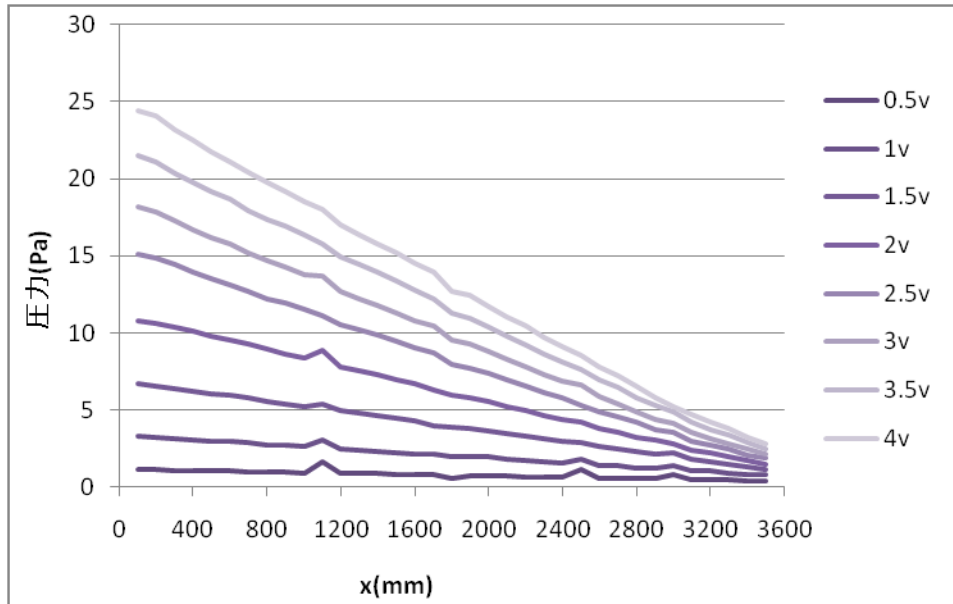


図 4.30 2 秒風速増加時のピーク正圧の測定位置との関係

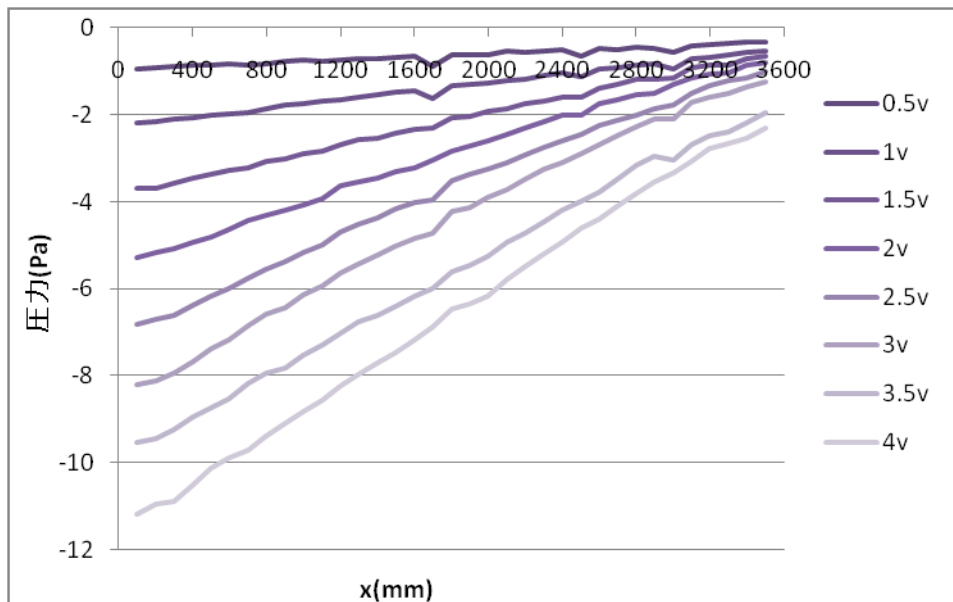


図 4.31 2 秒風速減少時のピーク負圧の測定位置との関係

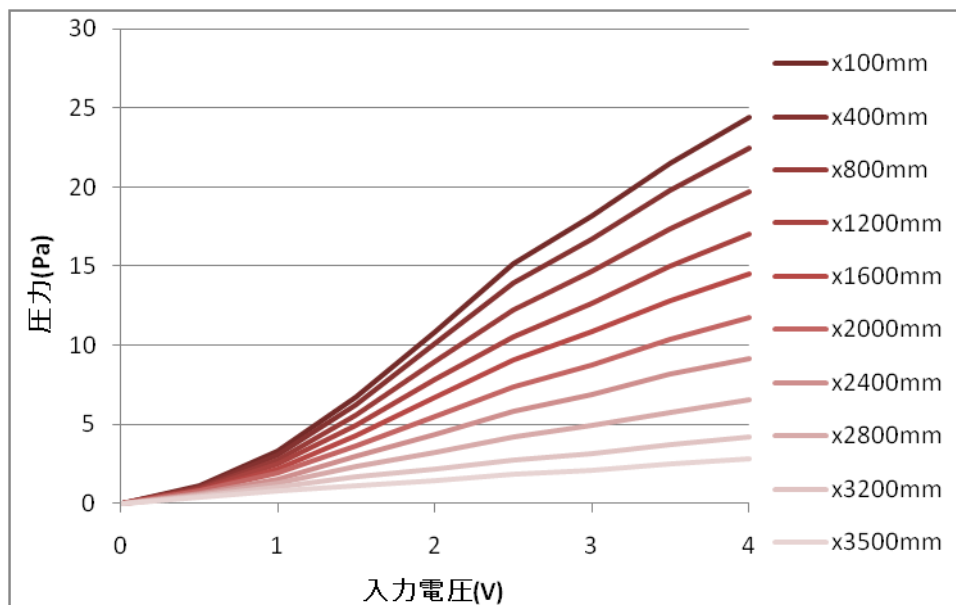


図 4.32 2秒風速増加時のピーク正圧の入力電圧との関係

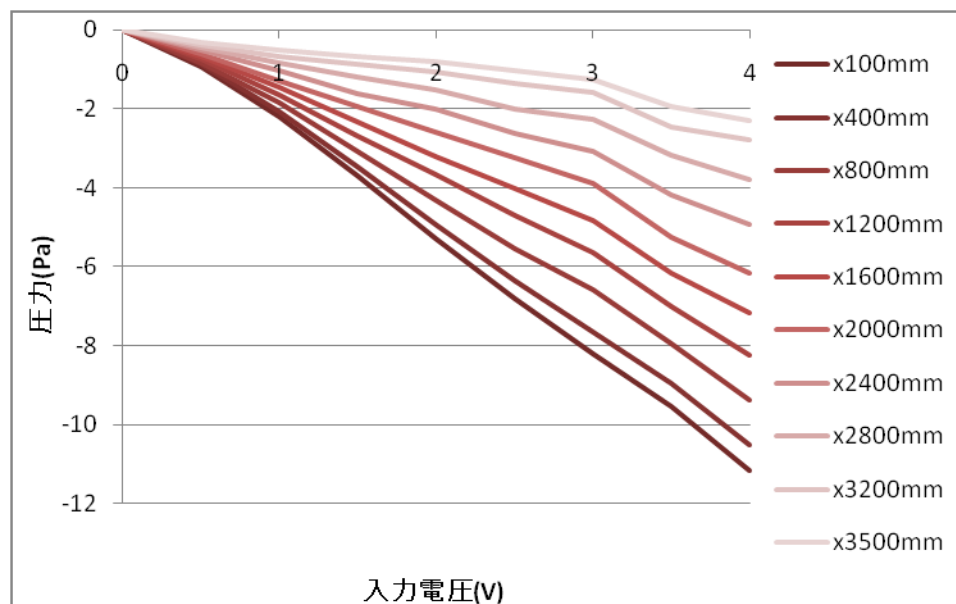


図 4.33 2秒風速増加時のピーク正圧の入力電圧との関係

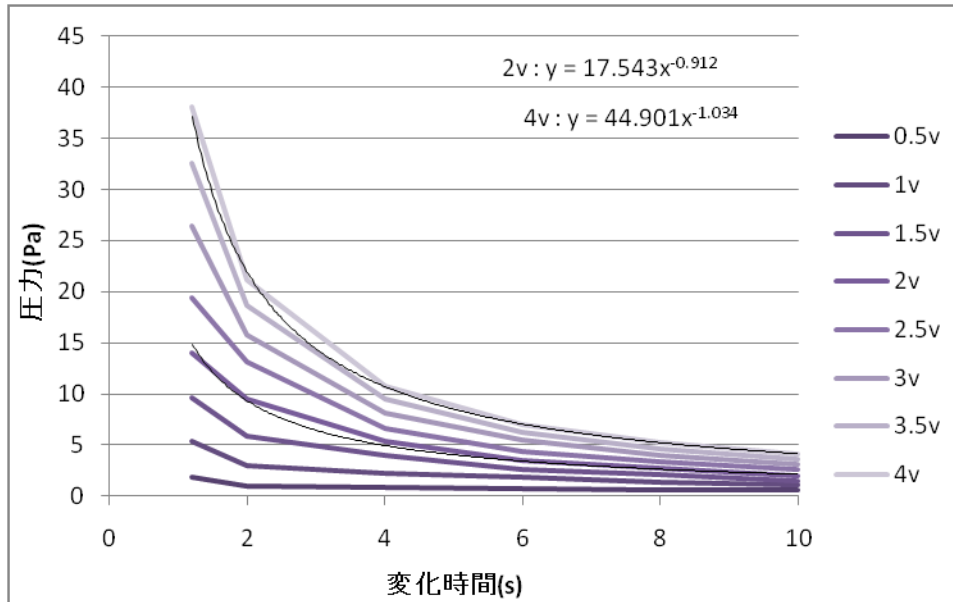


図 4.34 x=600mm での風速増加時のピーク正圧の変化時間との関係

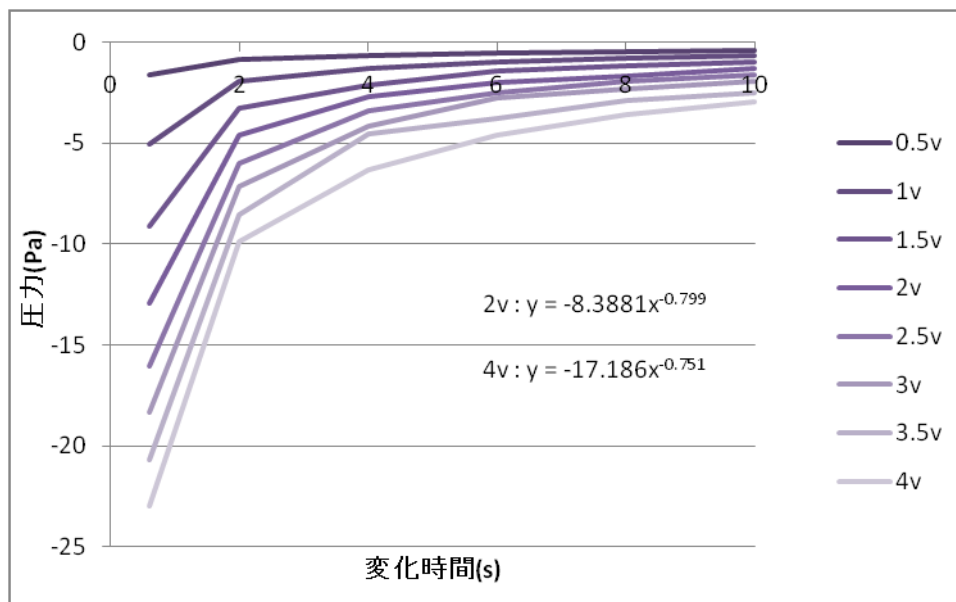


図 4.35 x=600mm での風速減少時のピーク負圧の変化時間との関係

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4.17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4.36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出てくると思われる。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。実現途中で、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。

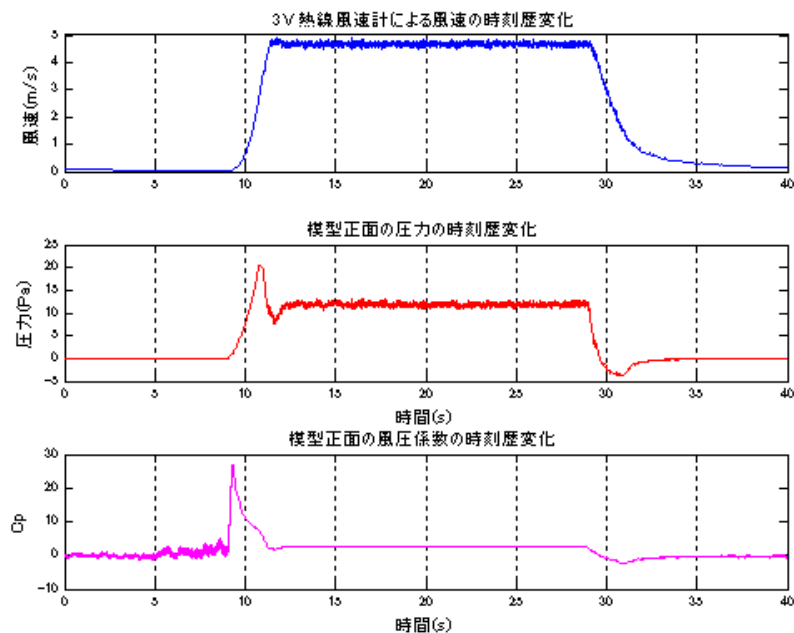


図 4.36 模型正面部を仮定した時の表面圧力の時刻歴変化

4.4 風向変化時における風洞内静圧分布

4.4.1 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4.36から図4.41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 、 3500mm 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 、 500mm の壁面での圧力の時刻歴を示している。

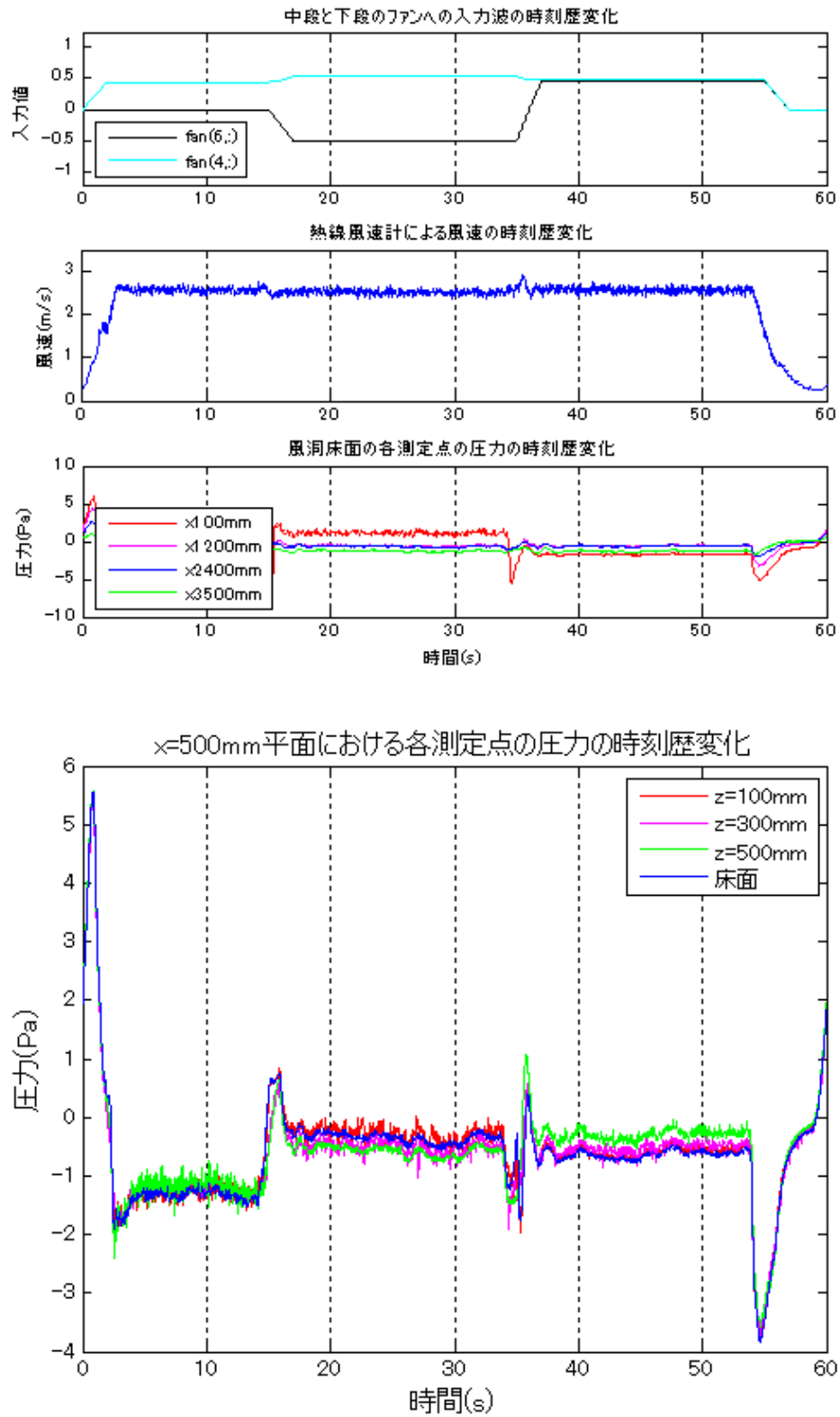


図 4.36 NDU5_2sec における風洞静圧の時刻歴変化

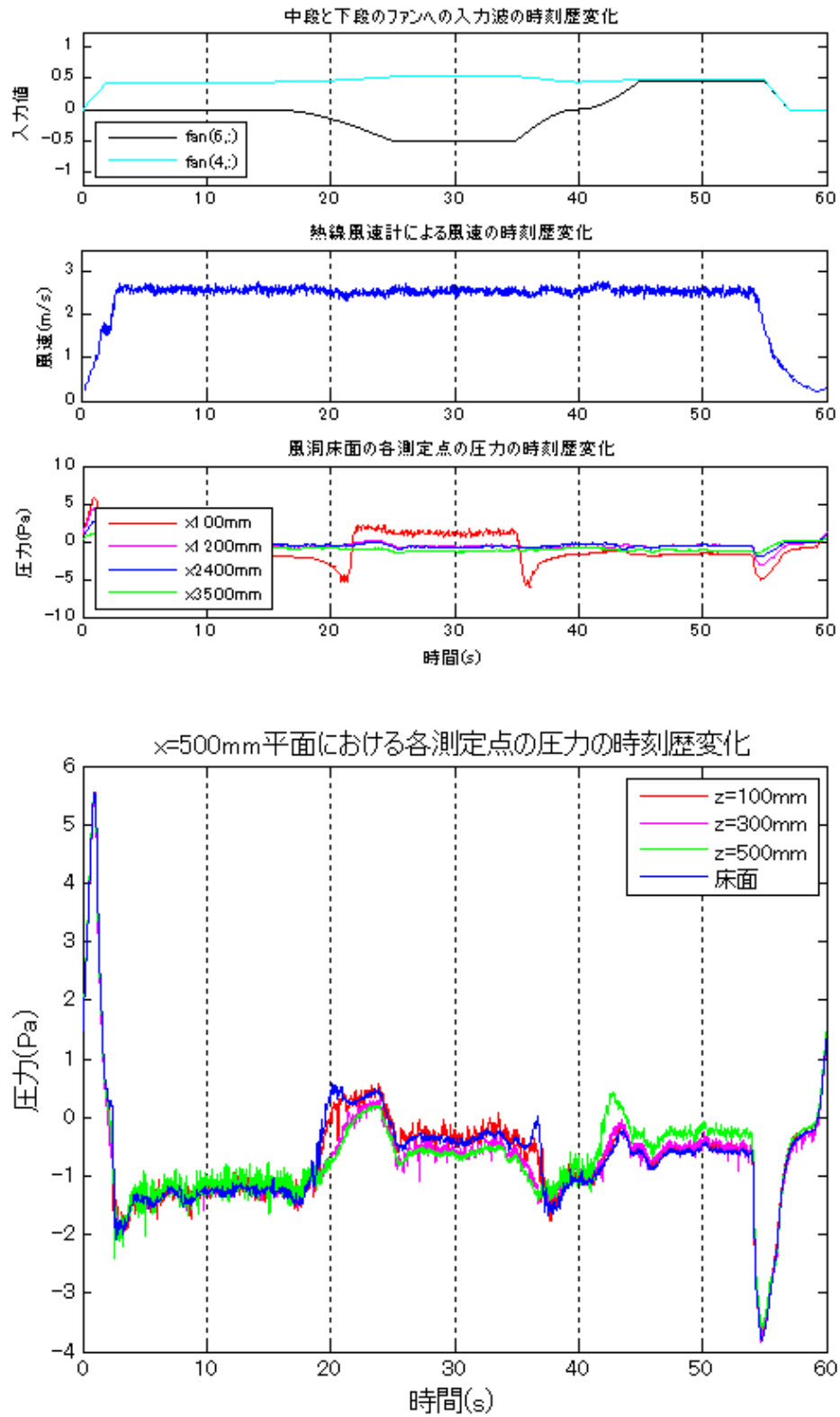


図 4.37 NDU5_10sec における風洞静圧の時刻歴変化

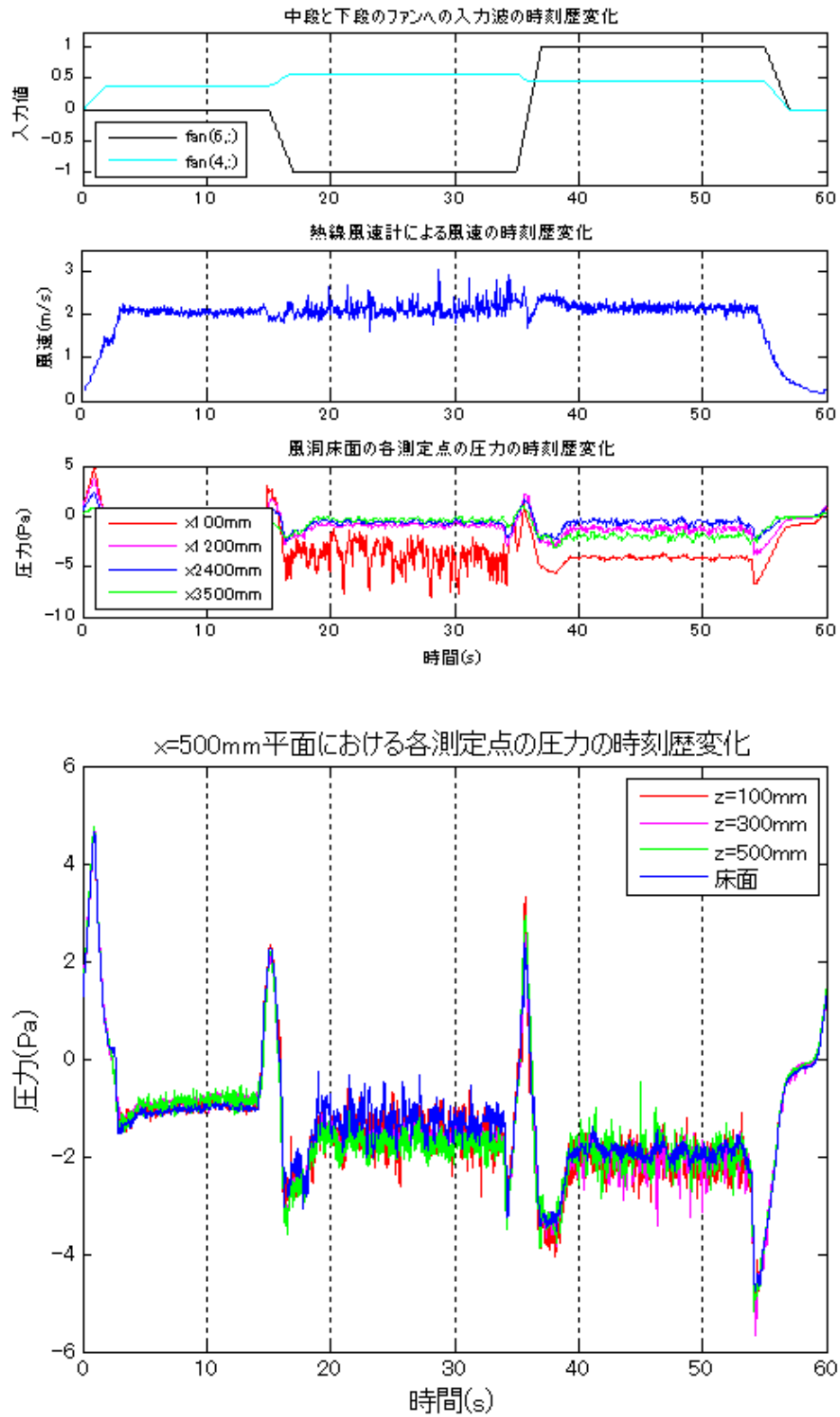


図 4.38 NDU7_2sec における風洞静圧の時刻歴変化

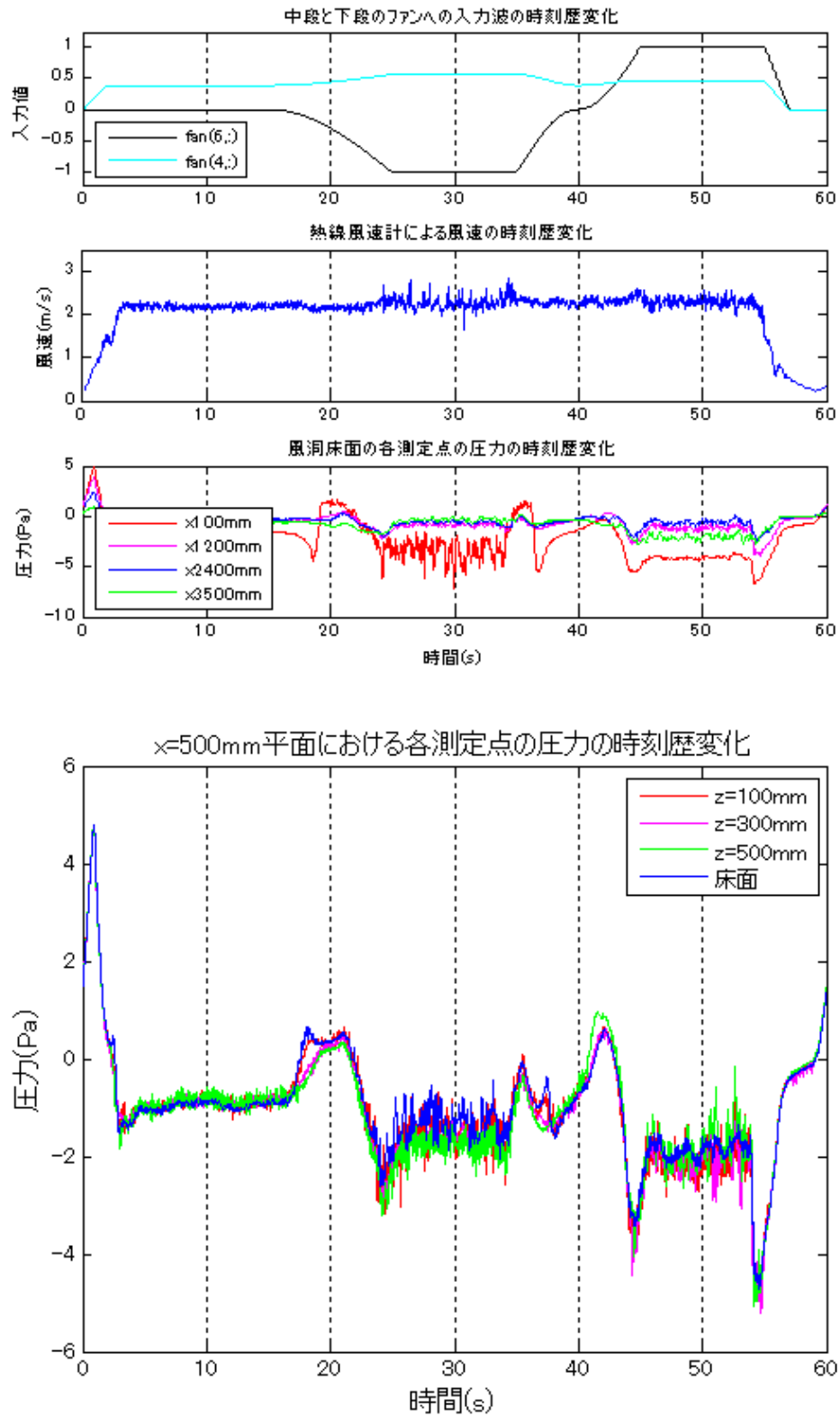


図 4.39 NDU7_10sec における風洞静圧の時刻歴変化

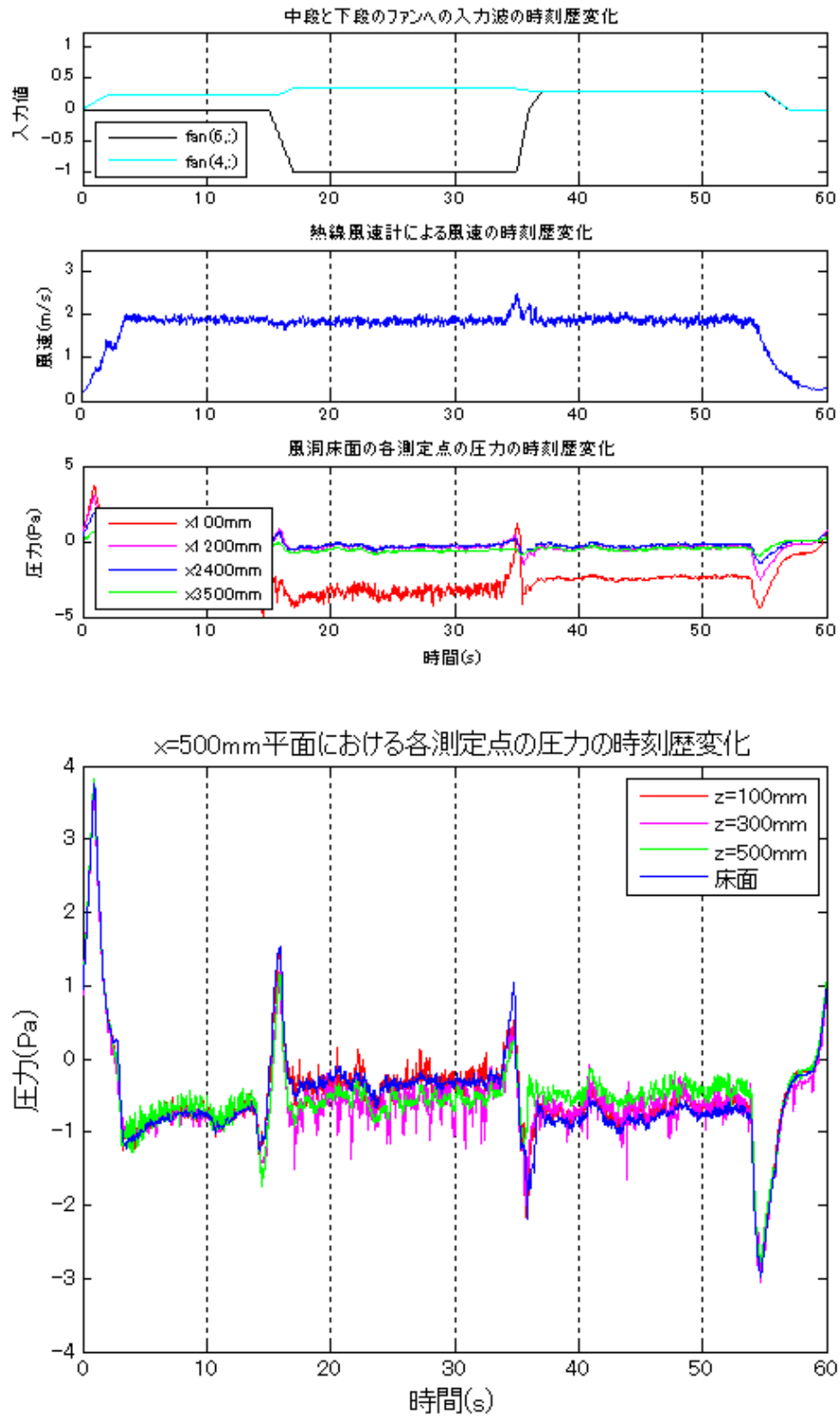


図 4.40 NDU10_2sec における風洞静圧の時刻歴変化

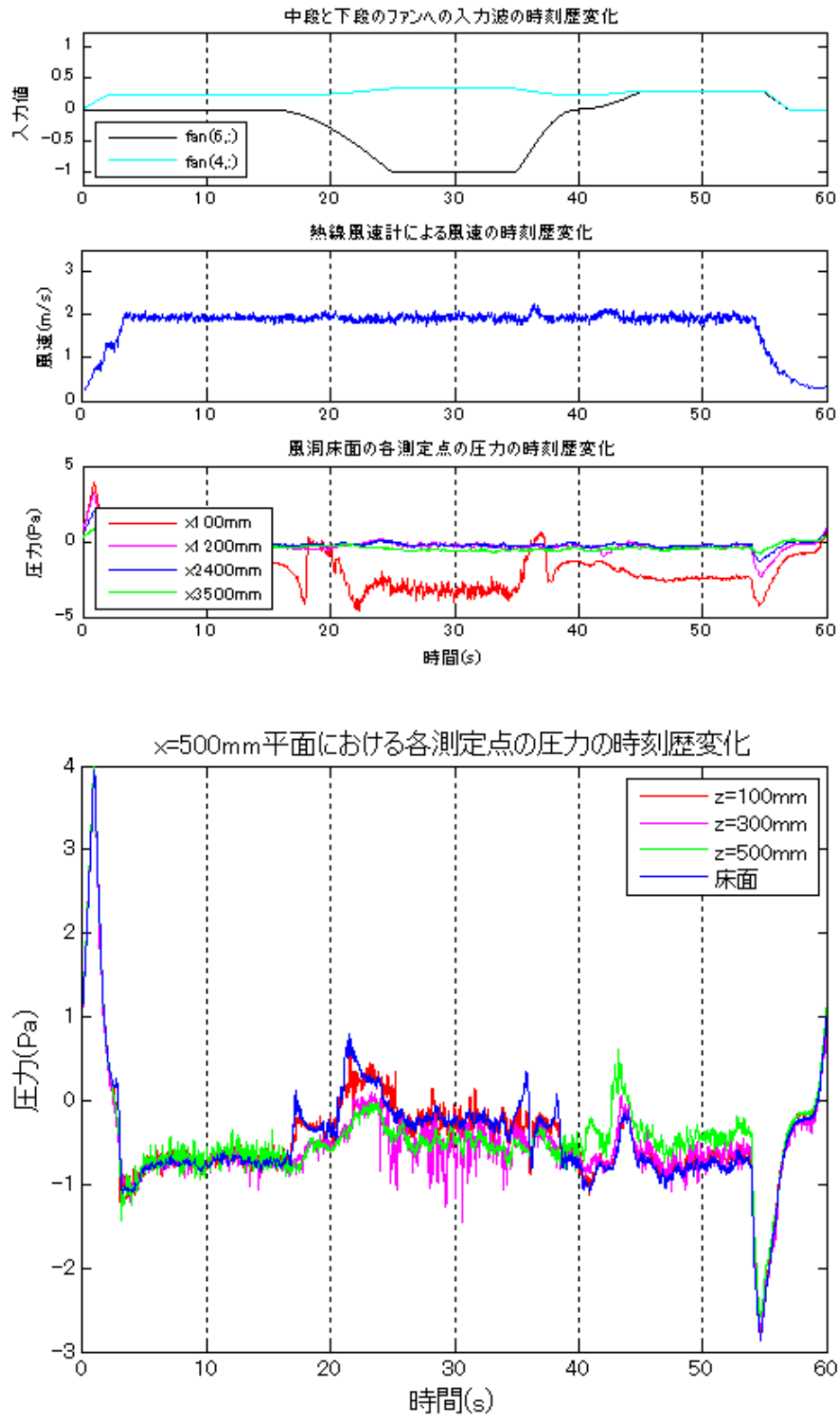


図 4.41 NDU10_10sec における風洞静圧の時刻歴変化

4.4.2 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 5 章-

2次元模型の表面圧力測定実験

5.1 本章の概要

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*5-1の1例を図5.1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。

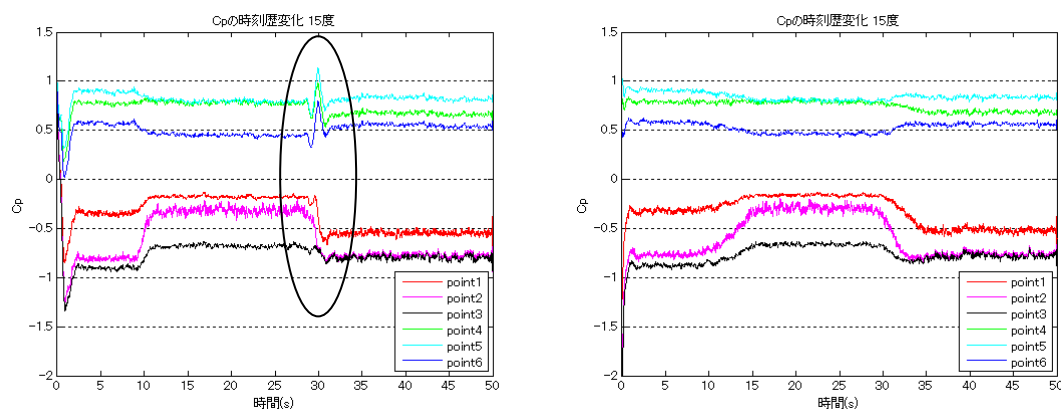


図 5.1 1列複数ファン風洞における風圧係数の時刻歴変化の1例

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

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho U_R^2} \tag{5.1}$$

を用いる。ここで、4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3章の実験で求めた風速を利用する。

また、模型を設置した場合の風洞内の気流の性状は、模型を設置していない場合とは異なってくる可能性がある。そこで、本実験ではまず2次元円柱模型を用いて風圧係数の算定を行い、各入力波による角度や圧力の大きさの関係を調べる。その結果をもって、2次元角柱模型の圧力測定の補正を行い、風向変化が2次元角柱の応答にどのような影響を与えるのかを明らかにする。

5.2 圧力測定実験の概要

5.2.1 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 5.2 と図 5.3 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、 400mm 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 5.4 に示す。また、2次元的に配置を見た場合を図 5.5 と図 5.6 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度傾けての測定の2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。

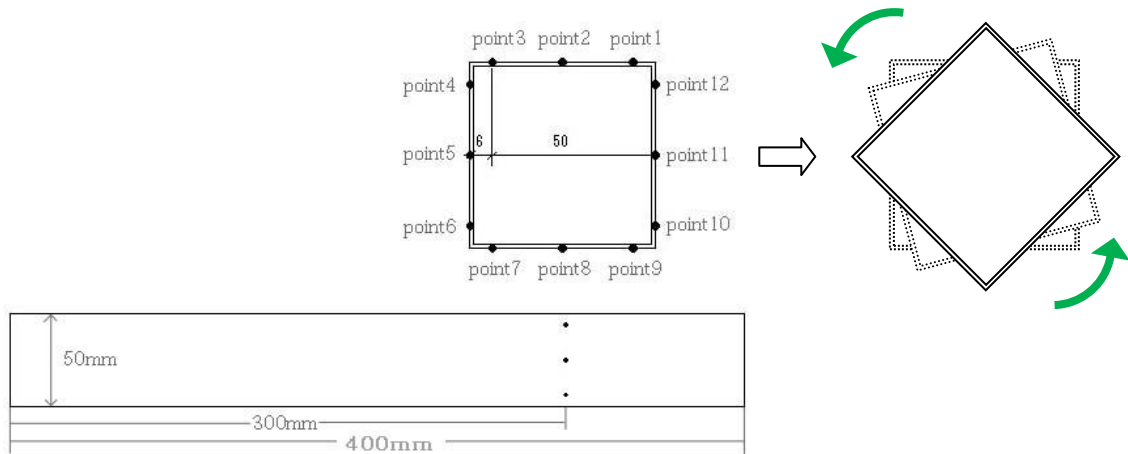


図 5.2 角柱風圧模型

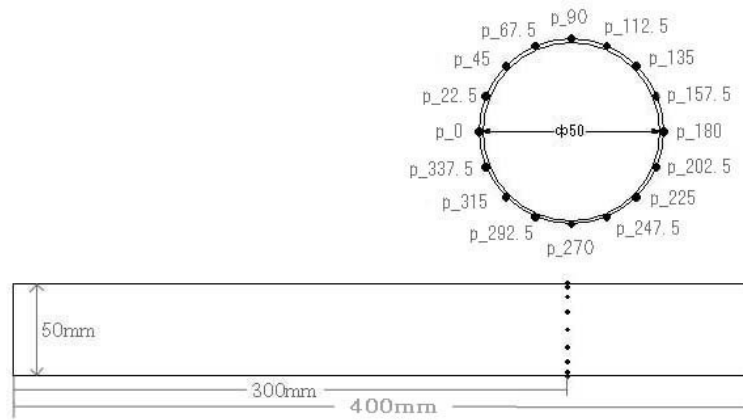


図 5.3 円柱風圧模型

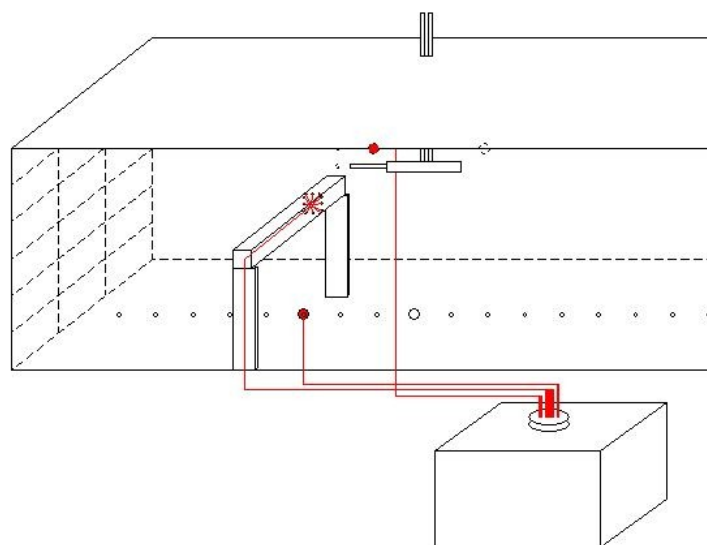


図 5.4 圧力測定模型の設置状況

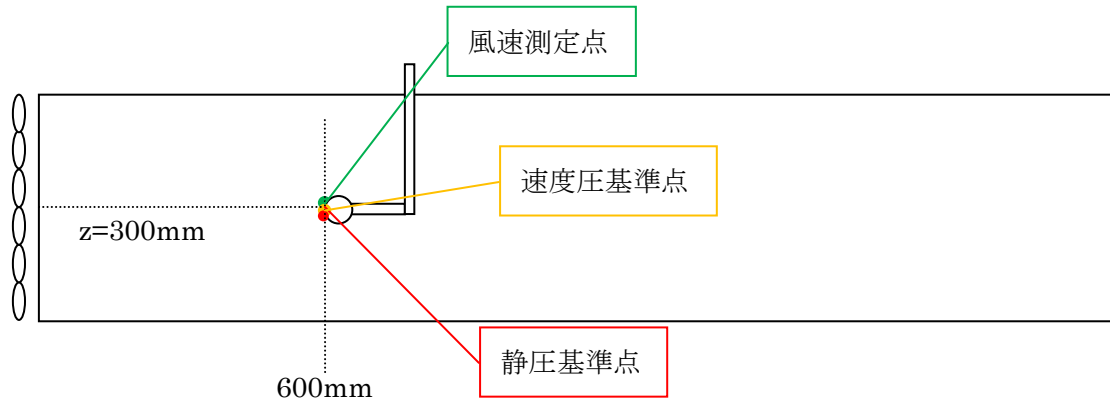


図 5.5 str7,str10 の模型設置時の xz 平面

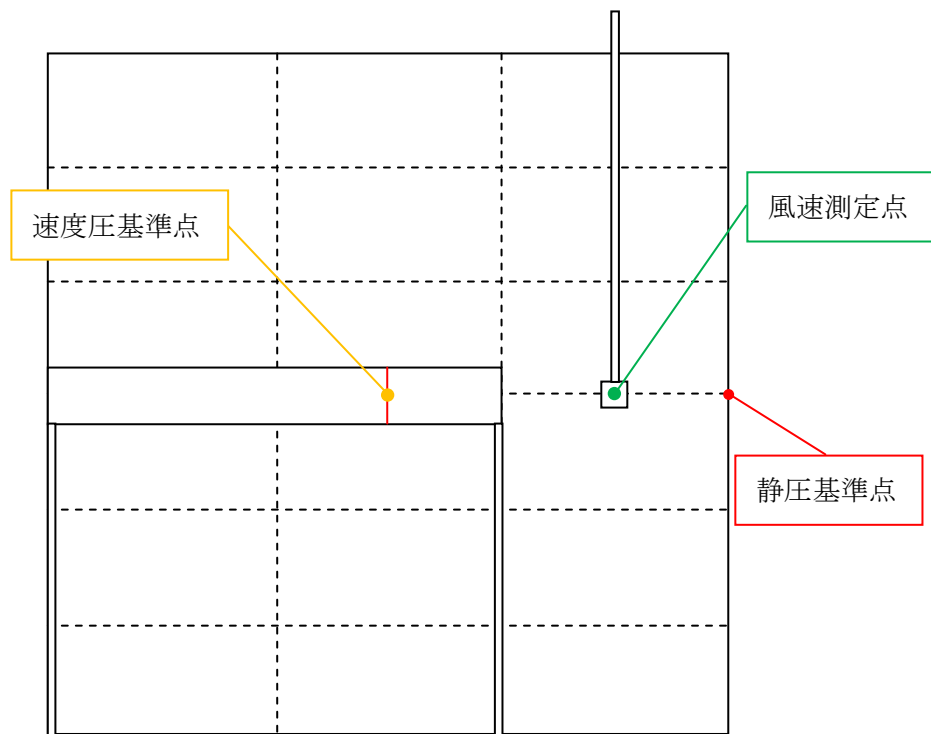


図 5.6 str7,str10 の模型設置時の yz 平面

5.2.2 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^{5.2}は次式に従う。

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho U_R^2} \quad (5.2)$$

p : 表面圧力(Pa)

ρ : 空気密度(気温 15 度の実験においては 1.22kg/m³)

U_R : 基準風速(m/s)

この式に 4.1 式を代入して、

$$C_p = \frac{p' - p_s}{\frac{1}{2}\rho U_R^2} \quad (5.3)$$

この式を時間的に拡張すると、

$$C_p(t) = \frac{p'(t) - p_s(t)}{\frac{1}{2}\rho U_R(t)^2} \quad (5.4)$$

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。

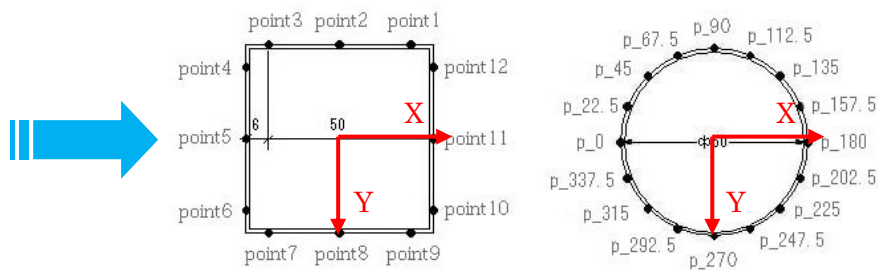


図 5.7 模型の座標設定

風力係数は次式によって求める。

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho U_R^2 L} \quad (5.5)$$

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 5.7** の座標系に基づけば、それぞれ角柱模型では

$$F_X = (12 \times p_{p_4} + 36 \times p_{p_5} + 12 \times p_{p_6} - 12 \times p_{p_{10}} - 36 \times p_{p_{11}} - 12 \times p_{p_{12}})/1000 \quad (5.6)$$

$$F_Y = (12 \times p_{p_1} + 36 \times p_{p_2} + 12 \times p_{p_3} - 12 \times p_{p_7} - 36 \times p_{p_8} - 12 \times p_{p_9})/1000 \quad (5.7)$$

円柱模型では、

$$F_X = \sum p_{p,k} \times \cos(k) \times 50 \times \pi / 1000 \quad (5.8)$$

$$F_Y = \sum p_{p,k} \times \sin(k) \times 50 \times \pi / 1000 \quad (5.9)$$

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、

$$C_F(t) = \frac{F(t)}{\frac{1}{2}\rho U_R(t)^2 D} \quad (5.10)$$

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 **5.6 式** から **5.9 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。

5.3 定常状態の下での模型表面風圧力

5.3.1 実験内容

3章での測定は模型が何もない状態での測定であったので、今回のように模型を設置した場合、具体的にどのような風向になるのかは測定していない。そこで、3章にて作成した str5, str7, str10 のそれぞれの状態 Neutral, Down, Up を入力し、その時の風圧係数の分布を調べる(図 5.8)。特に、模型の設置角度を変化させたときに生じる表面圧は異なるので、それらをまとめる。

本実験において、流れの場を表すパラメータであるレイノルズ数 Re は

$$Re = \frac{UL}{\nu} \approx 7UL \times 10^4 \quad (5.11)$$

U：代表風速(m/s)

L：代表長さ(m)

ν ：動粘性係数($0.145 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{sec}$)

の式より求められ^{*5-3}、風速が約 2m/s、代表長さが 0.05m より、 Re は 7000 となる。

なお、それぞれ計測時間は 10 秒のサンプリング周波数は 1000Hz で、10 回の測定からアンサンブル平均を行って数値を求めている。

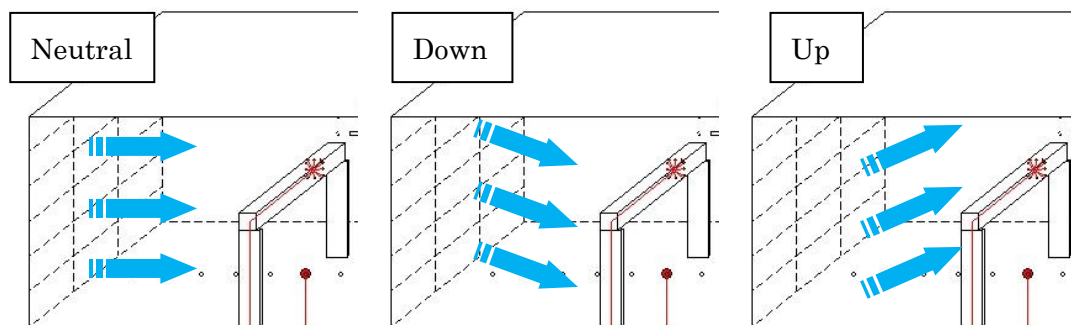


図 5.8 各種の定常状態における圧力測定

5.3.2 円柱模型の風圧分布

円柱模型の場合、風向に対する測定点の位置によって風圧係数が決まる。str5, str7, str10 について、それぞれの測定点の角度と風圧係数の関係をまとめたものを図 5.9、図 5.11、図 5.13 に示す。これらのグラフにおいて、Neutral と Down、Up はそれぞれ値が異なっている。これらの値は数値を 1 次式的に補正することで、ちょうど重なりあうことが 1 列複数ファン風洞における実験において確かめられている。そこで、Neutral を基準として、Down と Up の風圧係数を計算、補正する。計算した補正式を表 5.1 に示す。図 5.10、図 5.12、図 5.14 にそれぞれの補正後の様子を示す。

ここで、補正用の数値のそれぞれの意味について考える。角度成分を変化させることはグラフを水平に移動することを意味する。これは風向が Neutral の対してどの程度傾いているかを示すものである。比較のため、3 章にて求めたそれぞれの気流におけるデータを表 5.2、表 5.3、表 5.4 に示す。表のデータと比較すると、Neutral と Down の風向の差、Neutral と Up の風向の差がそれぞれ補正角度と対応することになり、数値的にもある程度一致することが見て取れる。

また、風圧係数の数値を補正する式をそれぞれ見てみると、係数の第 1 項は、風圧係数にかかるものであるため、5.4 式と比べてみると、基準風速の大きさの分を補正していることになる。すなわち、係数が大きいことは風速が想定しているものより大きくなっていて、逆に係数が小さいときには風速が想定より小さいということが考えられる。

また、補正係数の第 2 項は基準点からのずれを指し示すものであると考えられる。すなわち、基準静圧が、想定より大きいか小さいかを示していると考えられる。

表 5.1 円柱模型の風圧係数の補正式

	Down 補正	Up 補正
str5	角度 -3.2 数値 $C_p=0.98 \times C_p+0.03$	角度 +5.0 数値 $C_p=0.95 \times C_p+0.05$
str7	角度 -6.2 数値 $C_p=1.07 \times C_p+0.05$	角度 +7.5 数値 $C_p=1.03 \times C_p-0.02$
str10	角度 -9.8 数値 $C_p=0.98 \times C_p-0.09$	角度 +11.2 数値 $C_p=1.1 \times C_p-0.1$

str5

表 5.2 風速測定における str5 の特徴

	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	-0.7	-4.7	4.4	9.0	2,4,6,8,10
NUD5	4	2.40	-0.7	-4.6	4.4	-9.0	2,4,6,8,10

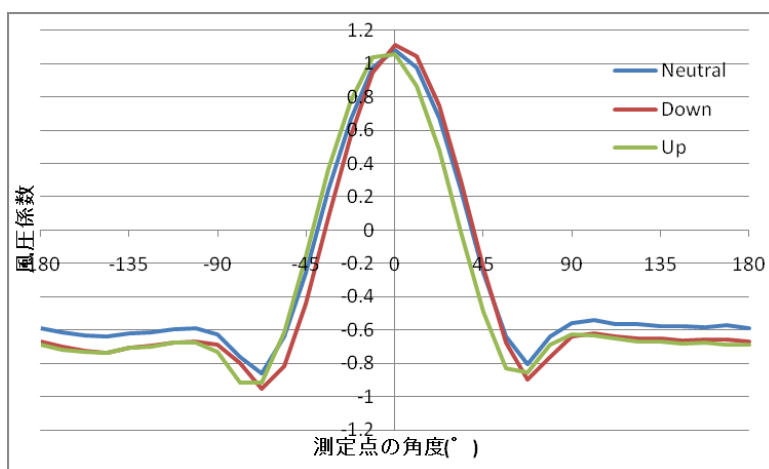


図 5.9 str5 における円柱模型の風圧係数

Down 補正
 角度 -3.2
 数値 $C_p=0.98 \times C_p+0.03$

Up 補正
 角度 +5.0
 数値 $C_p=0.95 \times C_p+0.05$

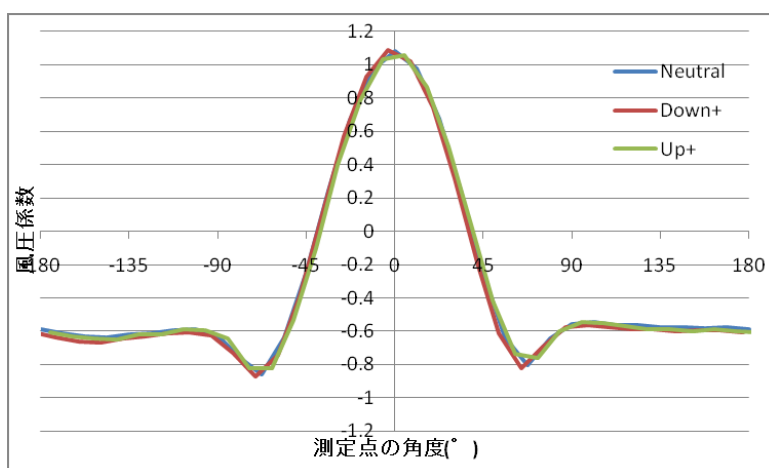


図 5.10 str5 における円柱模型の風圧係数の補正後

str7

表 5.3 風速測定における str7 の特徴

	Vlt0 (V)	平均風速 (m/s)	風向(°)			最大変化角度 (°)	変化時間 (sec)
			N	D	U		
NDU7	4	2.21	-0.7	-6.8	7.0	13.8	2,4,6,8,10
NUD7	4	2.16	-0.6	-6.4	7.4	-13.8	2,4,6,8,10

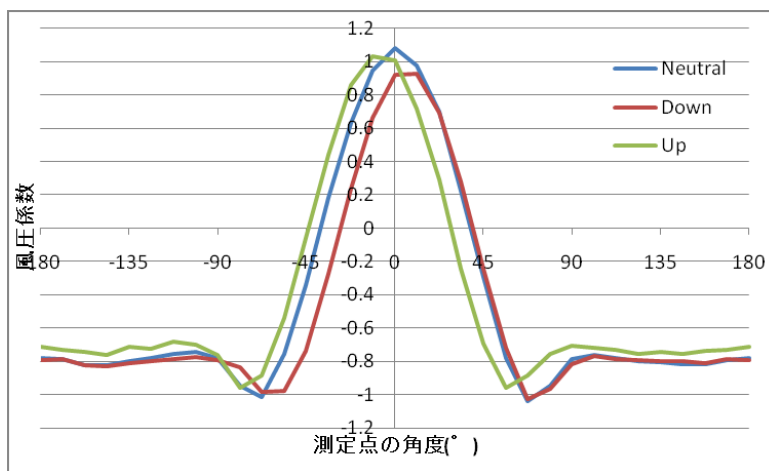


図 5.11 str7 における円柱模型の風圧係数

Down 補正
 角度 -6.2
 数値 $C_p=1.07 \times C_p+0.05$

Up 補正
 角度 +7.5
 数値 $C_p=1.03 \times C_p-0.02$

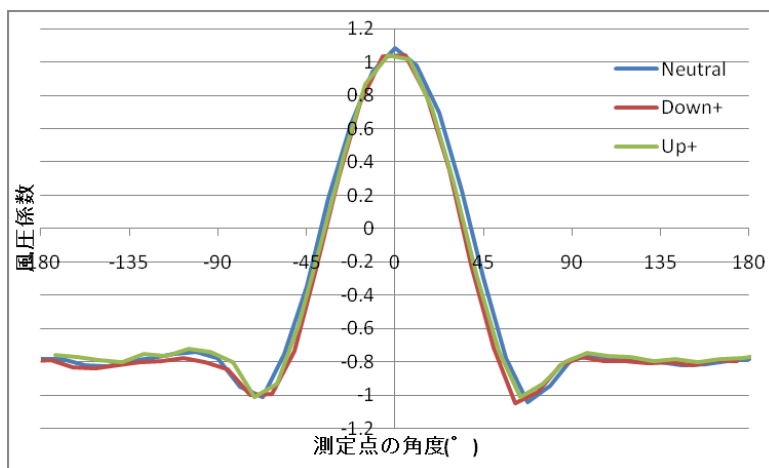


図 5.12 str7 における円柱模型の風圧係数の補正後

str10

表 5.4 風速測定における str10 の特徴

	Vlt0 (V)	平均風速 (m/s)	風向(°)			最大変化角度 (°)	変化時間 (sec)
			N	D	U		
NDU10	6	1.87	-0.8	-10.3	8.8	19.1	2,4,6,8,10
NUD10	6	1.88	-0.6	-10.5	8.7	-19.2	2,4,6,8,10

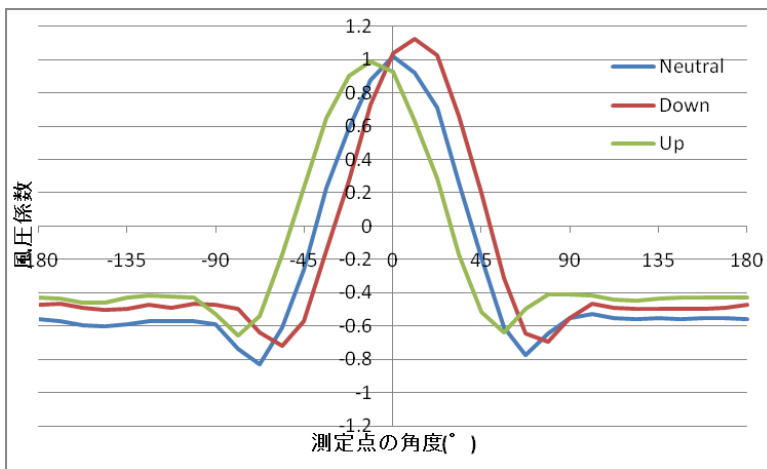


図 5.13 str10 における円柱模型の風圧係数

Down 補正
 角度 -9.8
 数値 $C_p=0.98 \times C_p-0.09$

Up 補正
 角度 +11.2
 数値 $C_p=1.1 \times C_p-0.1$

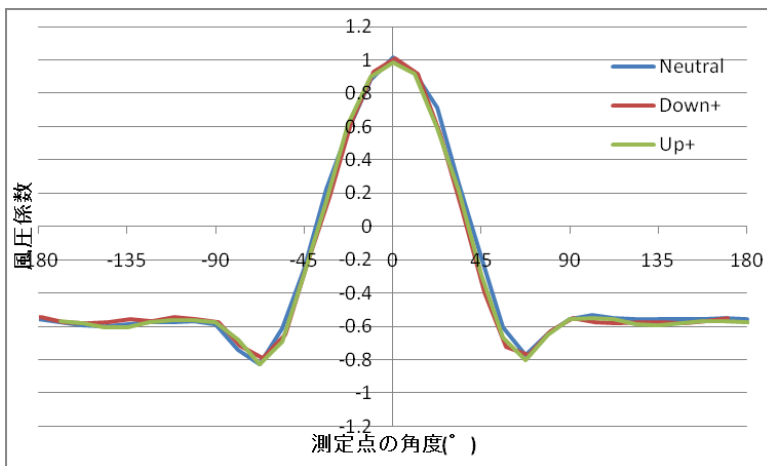


図 5.14 str10 における円柱模型の風圧係数の補正後

これらの結果を1列複数ファン風洞における結果と比較してみる。図5.15と図5.16に1列複数ファン風洞において測定された結果*5-4を示す。変化角度などから考えるとstr5における測定結果と良く対応する。1列複数ファン風洞において測定された数値は同様の補正が行える。そのとき、0°の位置における風圧係数が1.0よりかなり小さいなど、全体的に数値が小さい傾向が見て取れる。このことから、1列複数ファン風洞における実験では、基準風速が実際の値より大きく計算していたと考えられる。

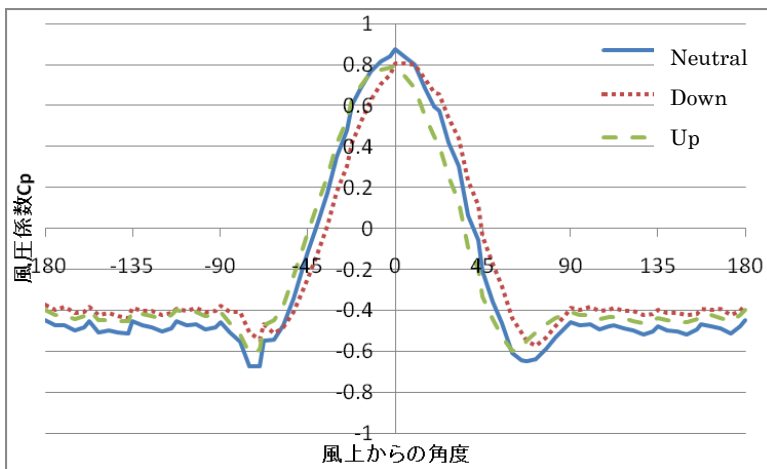


図 5.15 1列風洞実験における円柱模型の風圧係数

Down 補正
 角度 -4.8
 数値 $C_p=1.13 \times C_p-0.03$

Up 補正
 角度 +4.8
 数値 $C_p=1.1 \times C_p-0.11$

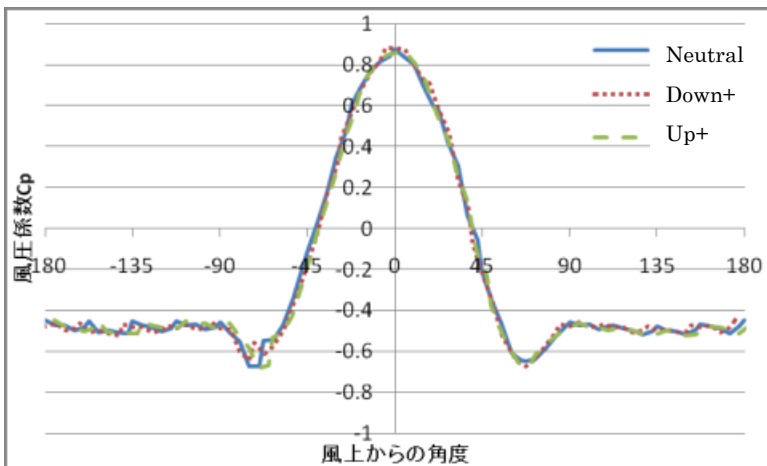


図 5.16 1列風洞実験における円柱模型の風圧係数の補正後

また、既存の他の研究との対応を見てみることにする。一般的な円柱周りの平均風圧係数分布について、**図 5.17**^{*5-3}に示す。2次元円柱周りの平均風圧係数分布はレイノルズ数 Re に応じた流れのパターンに対応している。ある程度角度以上で圧力が一定となり、その角度はほぼ剥離点の位置と一致する。本実験においては **5.11 式**より $Re=7000$ であり、円柱は亜臨界領域にある。本実験の結果は**図 5.17**のものより負圧は小さくなっているものの、剥離点の位置は一致している。このことから、本実験は理論的にも正しいものであると考えられる。

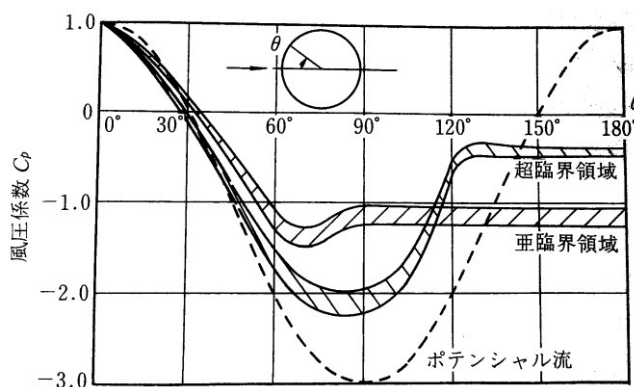


図 5.17 円柱の平均風圧係数分布のレイノルズ数による変化

以上の結果より、各風向における風圧係数を確認し、それを補正することで、ちょうど重なることを確かめた。このことからレイノルズ数などの条件がほとんど変化しないといえる。また、ここで求めた補正式を角柱模型における測定値などにも適用させることで、より正確な数値が得られると考えられる。

5.3.3 角柱模型の風圧分布

str5, str7, str10 のそれぞれの気流を与えた場合について、平均風圧係数と風力係数について、角度との関係をまとめたものを図 5.18 から図 5.29 に示す。それぞれの図は風向変化の影響を受け Neutral の状態から水平にずれている様子が確認できる。ここに先の円柱模型における実験で求めた補正值によって計算を行った上で、3つのグラフを重ねてみる。結果を図 5.21、図 5.25、図 5.29 に示す。多少の乱れはあるものの、Neutral を基準として3つの値がある程度一致している。このことから、円柱模型実験によって求めた補正值を角柱模型に対しても適用できることが確認された。このことから、次に行う非定常状態における模型表面風圧測定実験においても、この補正值を適用することでより正確な実験が行えるであろうことが予想される。

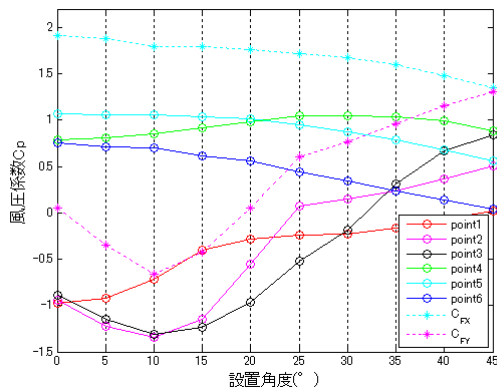


図 5.18 str5 の Neutral の Cp

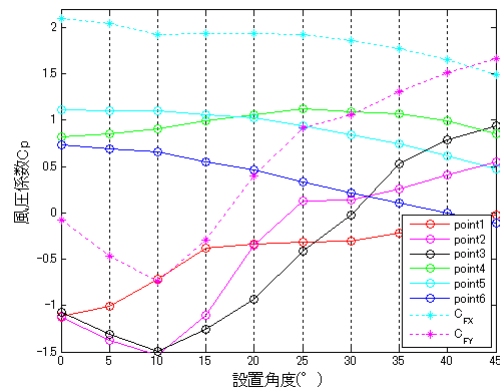


図 5.19 str5 の Down の Cp

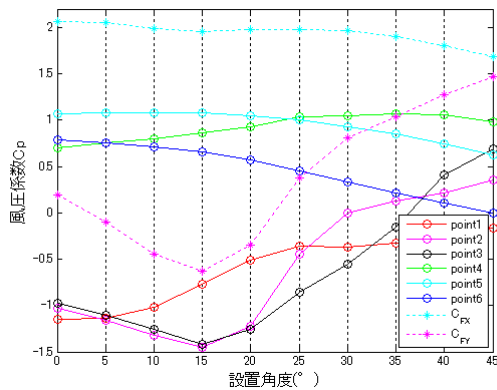


図 5.20 str5 の Up の Cp

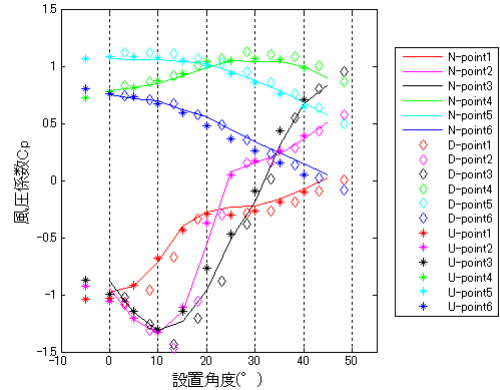


図 5.21 str5 の Cp の補正後

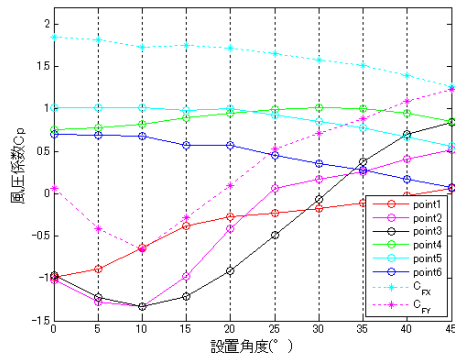


図 5.22 str7 の Neutral の Cp

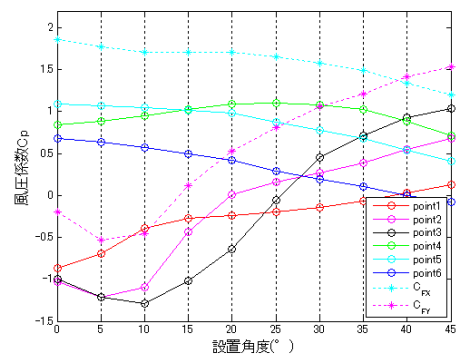


図 5.23 str7 の Down の Cp

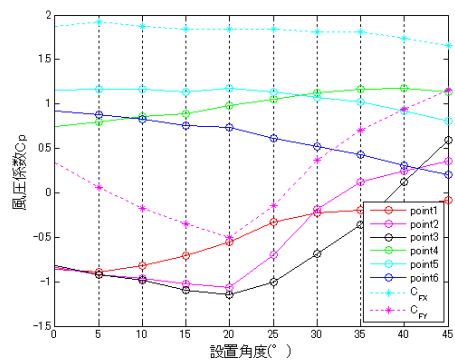


図 5.24 str7 の Up の Cp

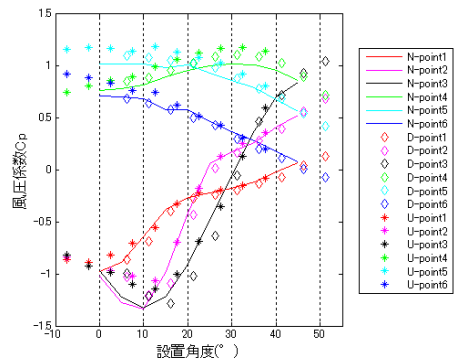


図 5.25 str7 の Cp の補正後

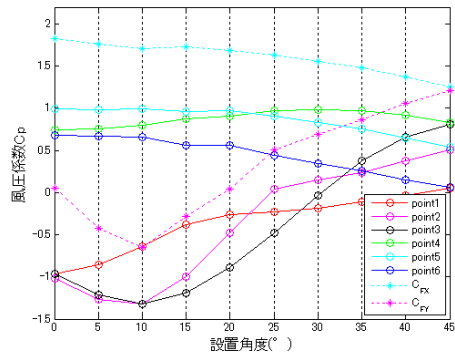


図 5.26 str10 の Neutral の Cp

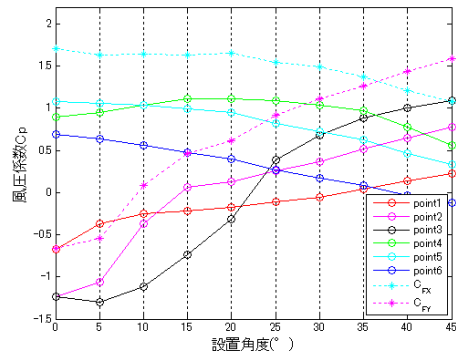


図 5.27 str10 の Down の Cp

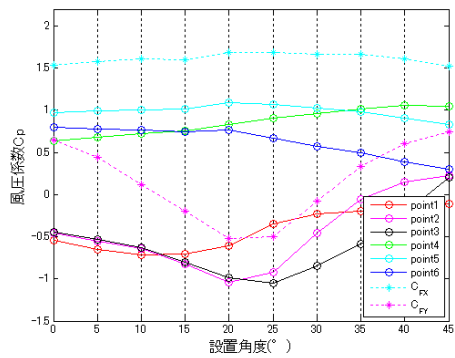


図 5.28 str10 の Up の Cp

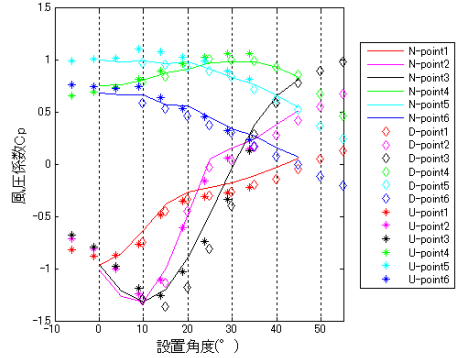


図 5.29 str10 の Cp の補正後

また、一般的な風洞における計測と比較のために、境界層風洞にて測定した角柱模型の表面風圧係数分布を図 5.30 から図 5.36 に示す。これらの計測は東京大学本郷キャンパスにあるエッフェル式境界層風洞（付録参照）を利用したもので、模型の寸法は幅 100mm×奥行 100mm×高さ 400mm である。図は模型の上半分に作用する風圧係数の分布を 0°~90° の範囲で示している。地表面粗度区分 I にあたるべき乗則に従った風速鉛直分布を持ち、模型上部における風速は 3.16m/s となっている。5.11 式より $Re=22000$ 程度である。

この図と 3 列複数ファン風洞における測定結果を比べると、境界層風洞における実験の $H=300\sim 340\text{mm}$ 付近における測定値の傾向が、2 次元的な実験である 3 列複数ファン風洞における Neutral での測定値と非常に似通っていることが分かる。このことから、3 列複数ファン風洞における測定値が妥当な結果であるといえるとともに、3 列複数ファン風洞の結果を逆算的に境界層風洞における実験値に適用することで、3 次元的な建物全体にかかる風圧力の評価の可能性を示している。

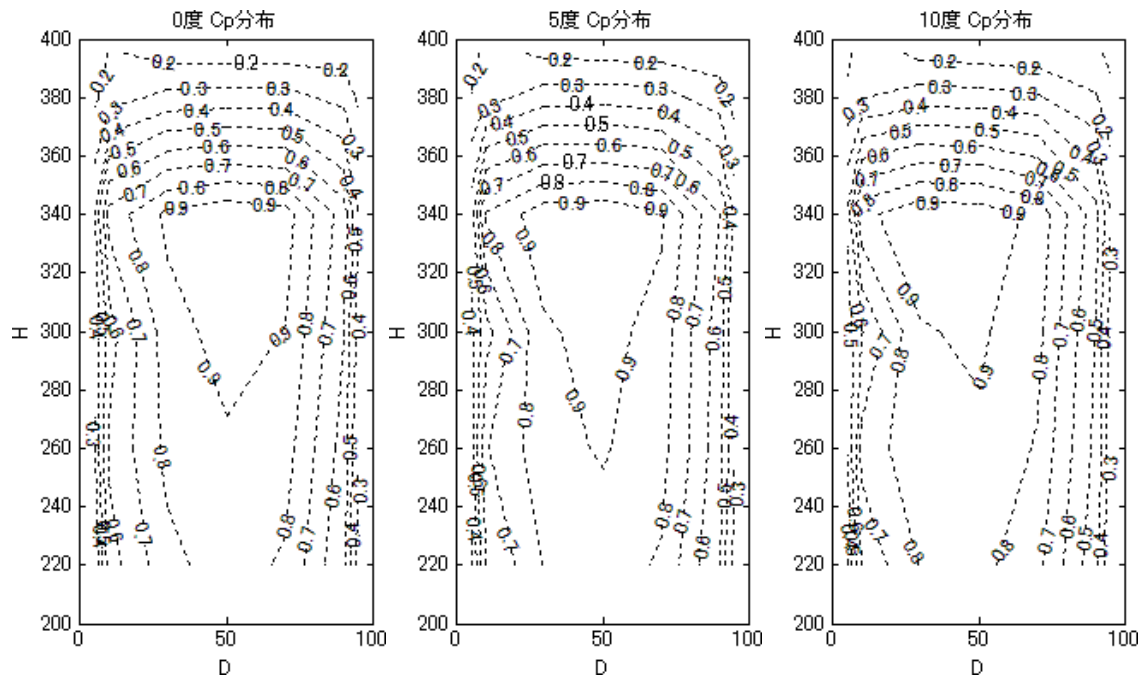


図 5.30 境界層風洞における角柱模型表面風圧係数分布 0°、5°、10°

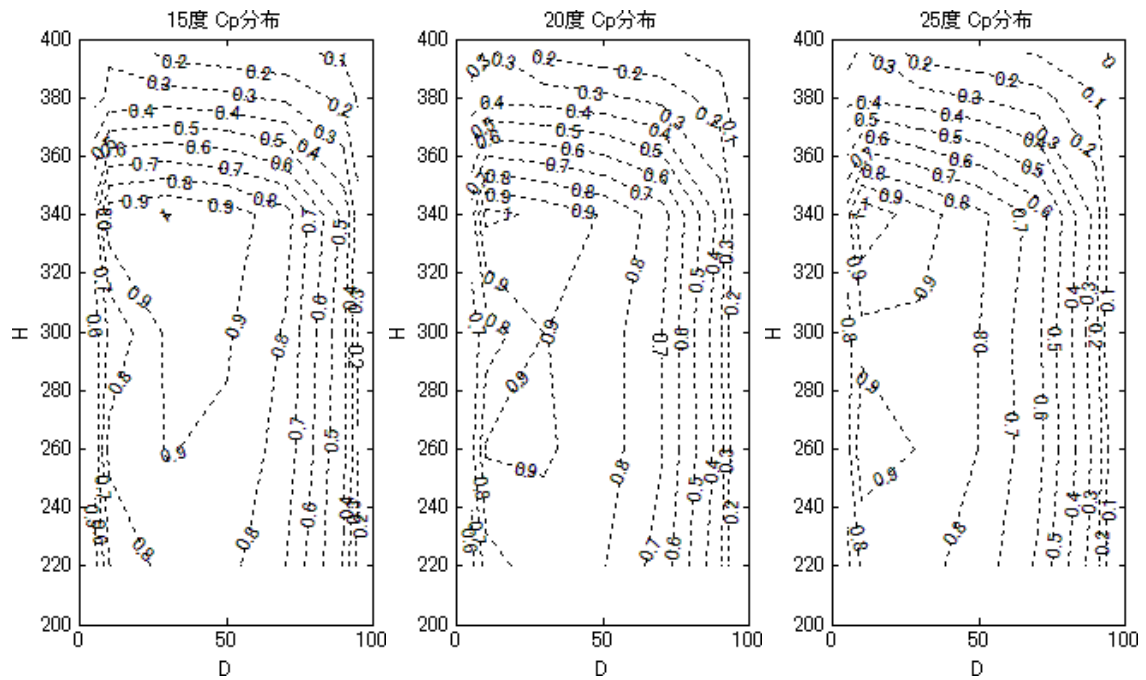


図 5.31 境界層風洞における角柱模型表面風圧係数分布 15°、20°、25°

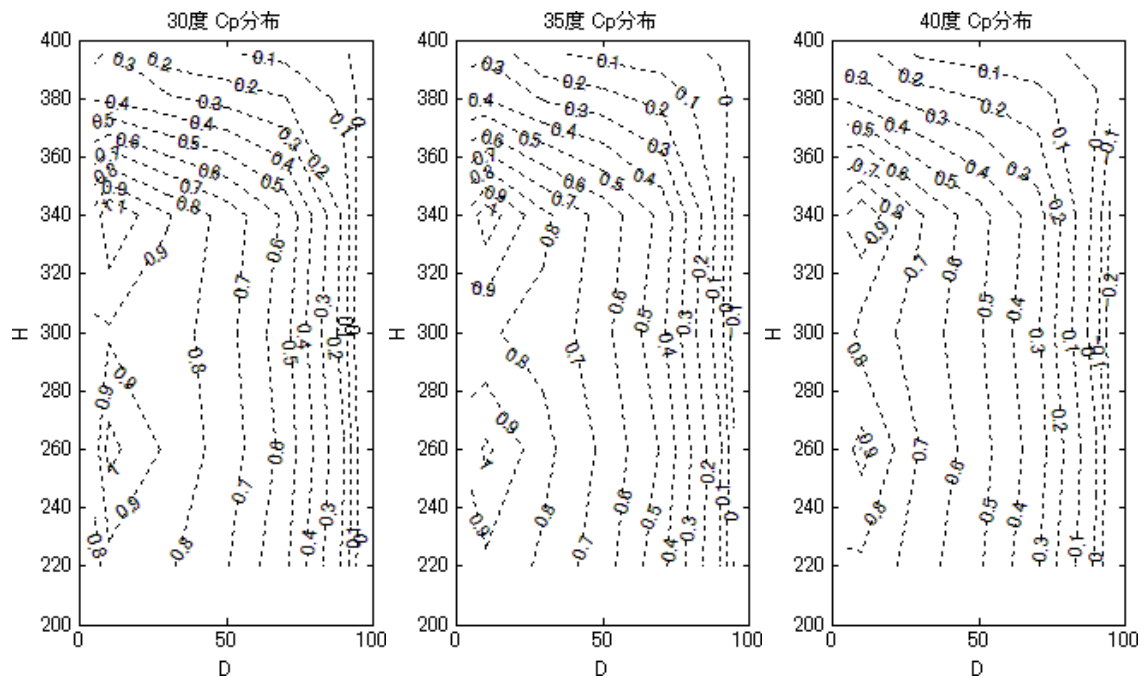


図 5.32 境界層風洞における角柱模型表面風圧係数分布 30°、35°、40°

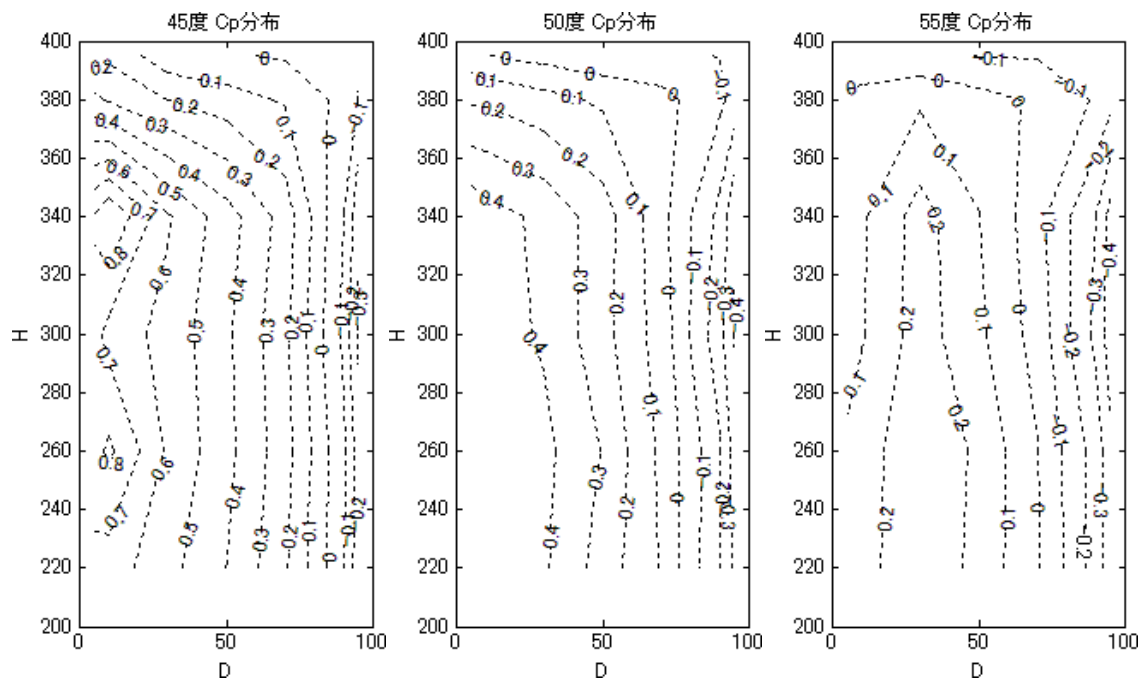


図 5.33 境界層風洞における角柱模型表面風圧係数分布 45°、50°、55°

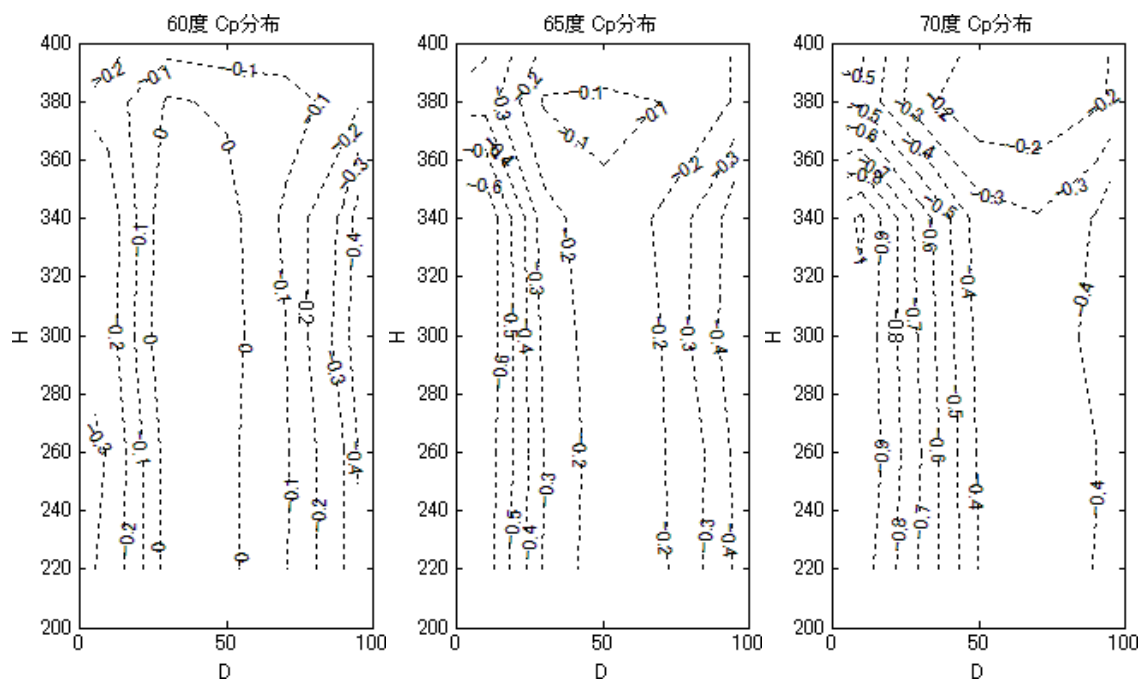


図 5.34 境界層風洞における角柱模型表面風圧係数分布 60°、65°、70°

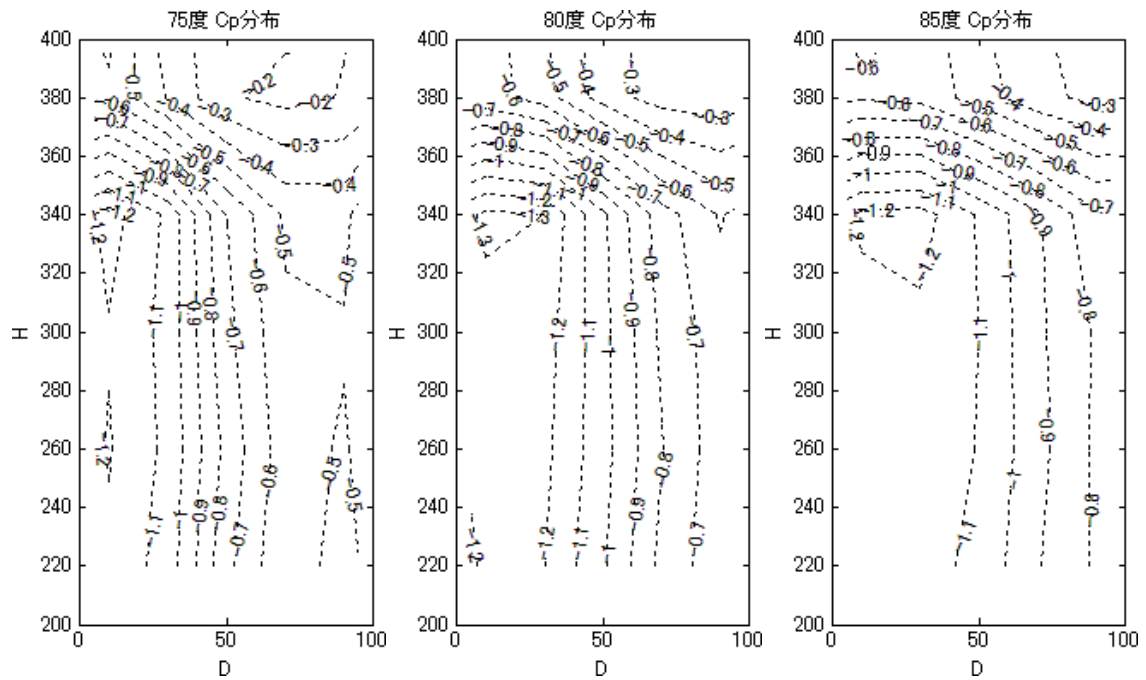


図 5.35 境界層風洞における角柱模型表面風圧係数分布 75° 、 80° 、 85°

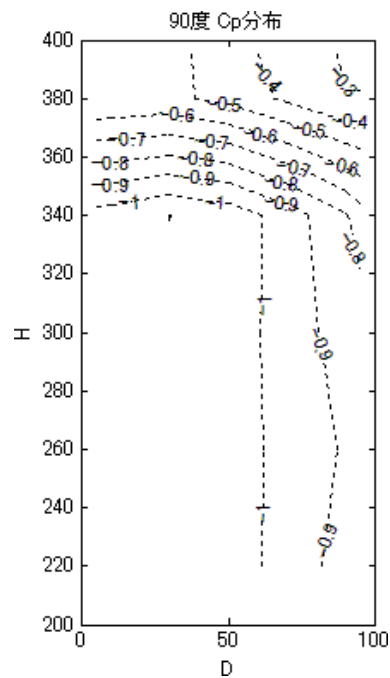


図 5.36 境界層風洞における角柱模型表面風圧係数分布 90°

5.4 非定常な風向変化の下での圧力の変化

5.4.1 実験内容

これまでに行ってきた実験の結果を集約する形で、非定常に風向変化する気流中での模型表面風圧の変動の様子について確認する。3章にて作成した表3.8のデータをファンに入力することで、風向の変化にかかる時間、風向変化する角度をパラメータとする。また、模型の設置角度を変えることでの変化も確認する。

測定と計算の方法は図5.37の通りに行う。本実験では5.4式の通りに計算を行う必要があるが、その際圧力測定と同時に計測する風速は不自然な乱れを多く含み、また、風向の情報を持つものではないので、基準風速として適したものではなかった。そこで、3章にて測定した風速・風向の時刻歴データを圧力測定のと同期することで、基準風速として計算の用いることとした。

なお、1回の計測時間は60秒でサンプリング周波数は1000Hz、2回の測定からアンサンブル平均を行い、かつ時刻歴データでは200個のデータを時間平均してグラフを平滑化し、数値を求めている。

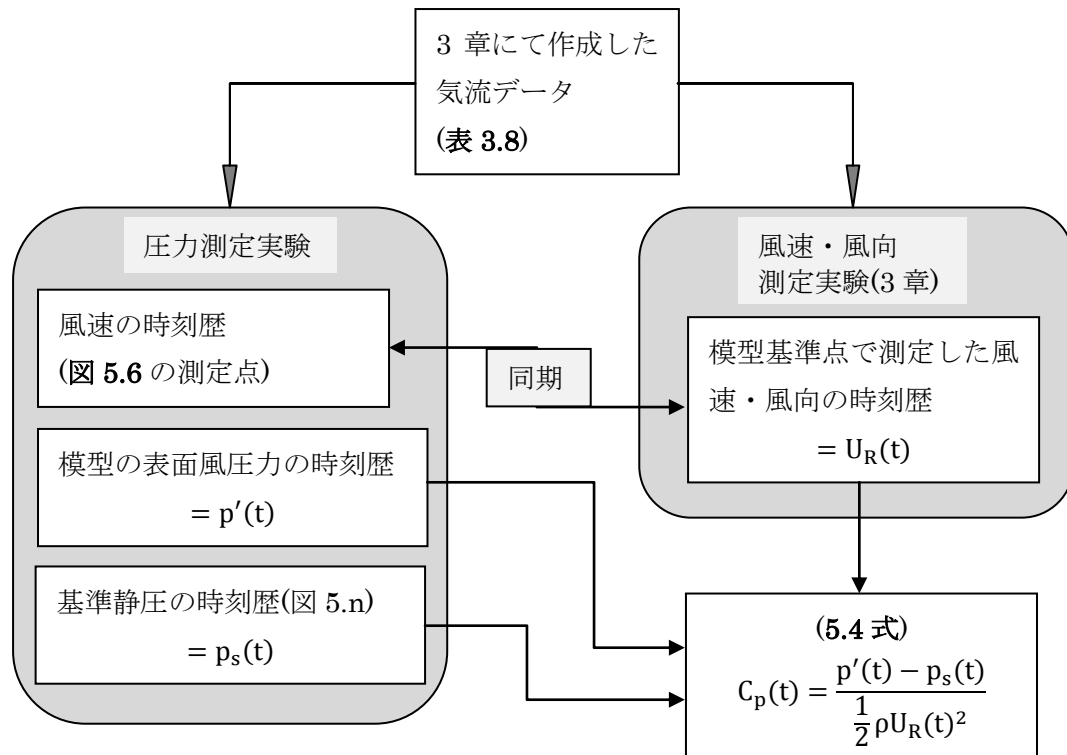


図 5.37 風圧係数の測定と計算の手順

5.4.2 角柱模型における測定結果

表 3.n に載っている気流は NDU4, NDU7, NDU10, NUD5, NUD7, NUD10 の 6 通りで、それぞれについて気流の変化にかかる時間が 2, 4, 6, 8, 10 秒の 5 通り、また、模型の設置角度を 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 度の 10 通りで変化させて、合計 300 パターンの計測を行った。それぞれのケースでの時刻歴データは膨大であるので、付録にてまとめた。

ここでは、特徴的な結果が得られたものについて見ていくことにする。各入力波をファンに与えた場合について、測定された時刻歴データを図 5.39 と図 5.41 に示す。それぞれのケースにおけるグラフ図 5.38 の並びに従い、左の列には風圧係数、右の列には風力係数に関するグラフが並び、それぞれ上の段には各種計算に用いたパラメータの時刻歴データが示されている。この結果には先の実験で求めた補正は施していない。

なお、表 3.8 のデータはそれぞれ測定開始から 15 秒の時点で Neutral から Down あるいは Neutral から Up の変化が始まり、35 秒の時点で Down から Up あるいは Up から Down の変化が始まるようになっているが、測定機器間における同期のため、測定開始から 3 秒ほどの時間の中でタイミングを合わせている。そのため、グラフ上では最初の変化は約 12 秒時点、次の変化は約 32 秒時点より変化が開始している。

風速の時刻歴変化 基準風速：3 章で計測 参照風速：圧力と同時計測	風速の時刻歴変化 基準風速：3 章で計測 参照風速：圧力と同時計測
風向の時刻歴変化 基準点での風向：3 章で計測	風向の時刻歴変化 基準点での風向：3 章で計測
測定圧の時刻歴変化 風洞床面：基準静圧値 風洞壁面：参考値 模型正面：比較用 模型側面：比較用	風力の時刻歴変化 F_x ：5.6 式より F_y ：5.7 式より
風圧係数の時刻歴変化 point1～point6	風力係数の時刻歴変化 C_{FX} ：5.10 式より C_{FY} ：5.10 式より
風圧係数の時刻歴変化 point7～point9	
風圧係数の時刻歴変化 point10～point12	

図 5.38 図の並び方

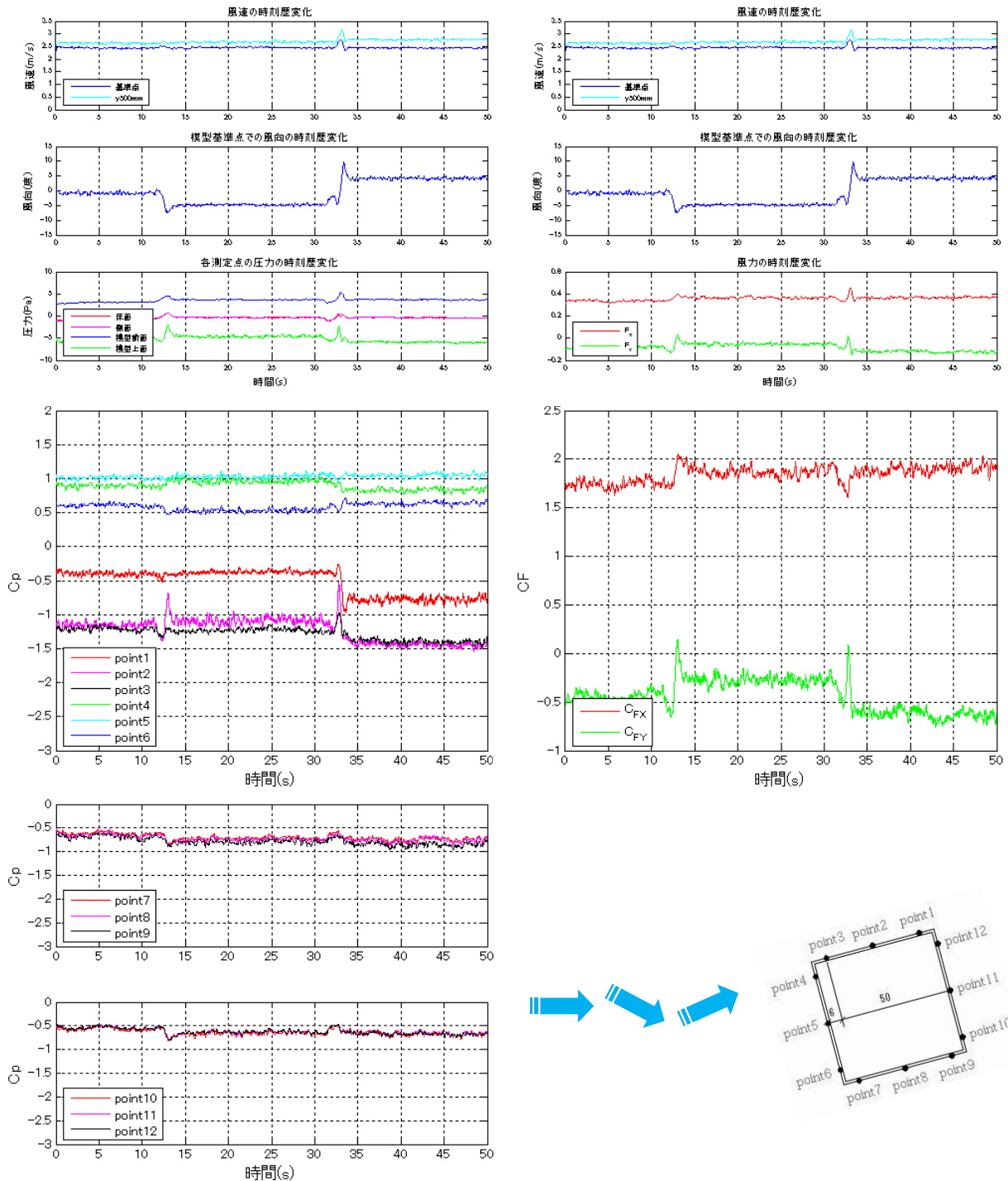


図 5.39 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 15° での時刻歴変化

まず、1列複数ファン風洞における実験データと比較して見る。

図 5.39 は、模型の設置角度を 15 度、NDU5 の 2 秒で変化する場合の気流を与えたものである。この実験条件は、1 列複数ファン風洞における実験結果の図 5.40 に対応するものである。この条件は、章の最初に乗せた図 5.1 と同じものであるが、30 秒付近での変化時に特徴的なピークが発生したものである。

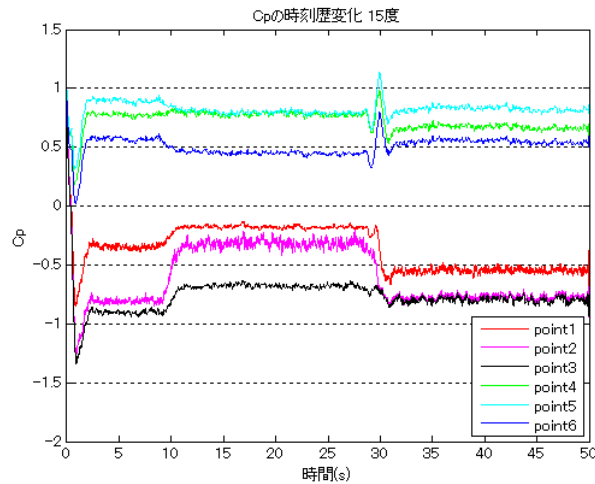


図 5.40 1 列複数ファン風洞における風圧係数時刻歴

1 列複数ファン風洞における実験結果は、3 列複数ファン風洞における実験結果と比べると、具体的な値が小さく出ている。これは、風圧係数算出の式である 5.4 式において、風速を実際よりも大きく評価しているからであると考えられる。

また、定常時の測定値の分布も模型正面部では似たような分布になっているが、模型側面部では、特に Down の状態(10 秒～30 秒付近)の時に分布の形状が異なっている。これは、先の円柱模型の定常状態化の実験でも確かめたことだが、1 列の時と比べて、3 列では Down の時に得られている風向が、模型を置いて状態では小さくなっているからであると考えられる。

何より、ここで比較するべきは、1 列の時に 30 秒付近での模型正面部における正圧のピークが、3 列では無くなり、おおよそなだらかな変化を起こしているということである。3 列の時の測定圧の時刻歴を見ても、模型側面の圧力値は、1 列の時のように変化時にピークが出ている様子が確認できる。しかし、風圧係数で見るとこのピークが消えているということは、5.4 式の数値基準圧による除算が適切であったということであり、このピークは風速の増加が原因にあったといえる。逆に、1 列の時にこのピークがあったということは、風速を適切に選択していなかった結果だと考えられる。

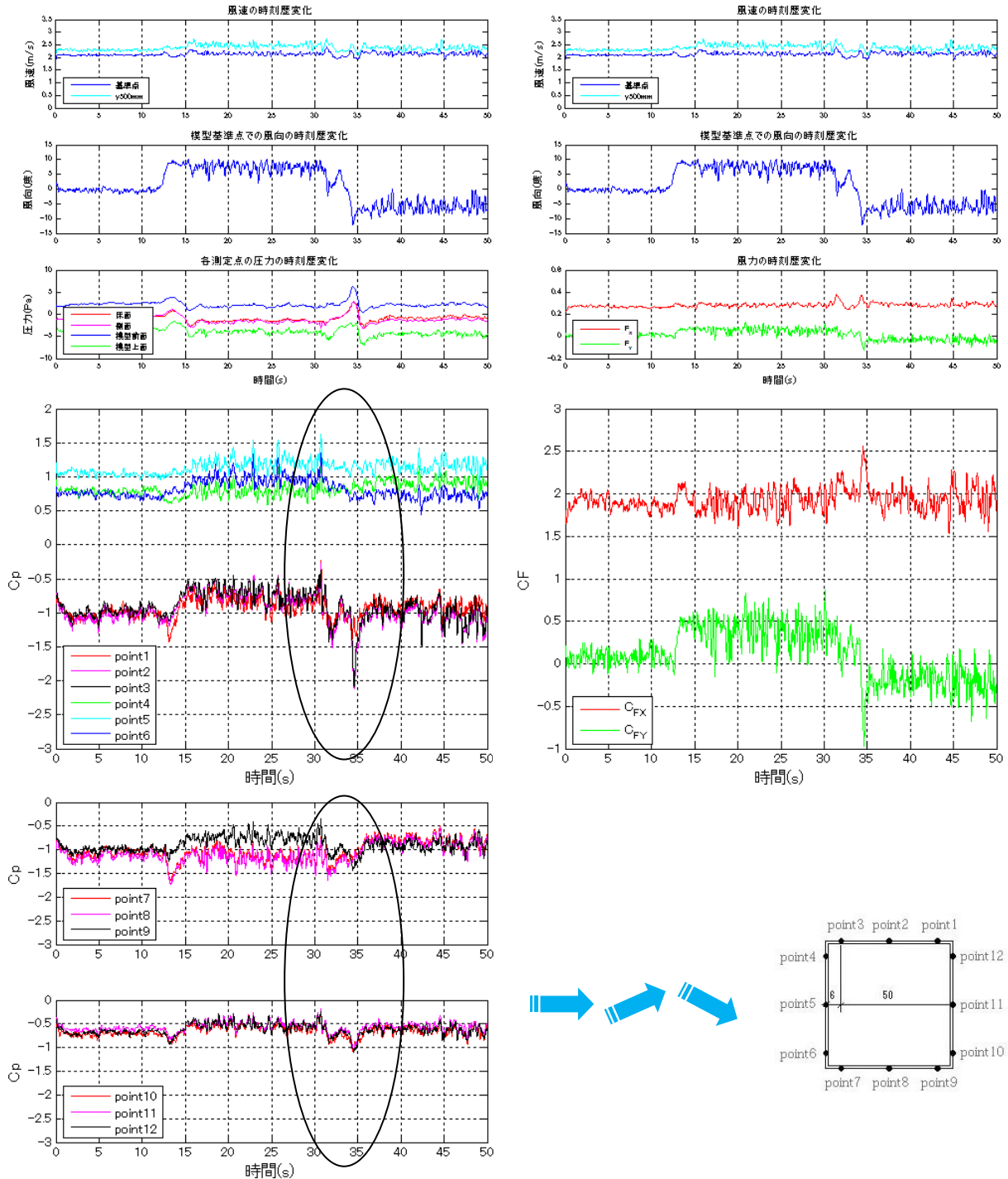


図 5.41 NUD7 の 4 秒変化時の模型角度 0° での時刻歴変化

次に、負圧のピークが発生したケースを確認する。

図 5.41 は、模型の設置角度を 0 度、NUD7 の 4 秒で変化する場合の気流を与えたものである。この条件において、35 秒手前の時点で、point2 と point3 で $C_p = -2$ 程度の大きな負圧が得られている。この数値は今回測定したケースの中では一番大きいものである。

しかし、似通った条件、例えば、模型の設置角度を 0 度、NUD7 の 2,6 秒で変化する場合(図 5.42、図 5.43)や、NUD5(図 5.44), NDU10(図 5.45)の場合にも負圧は観測されたが、ここまで大きな負圧は観測されなかった。

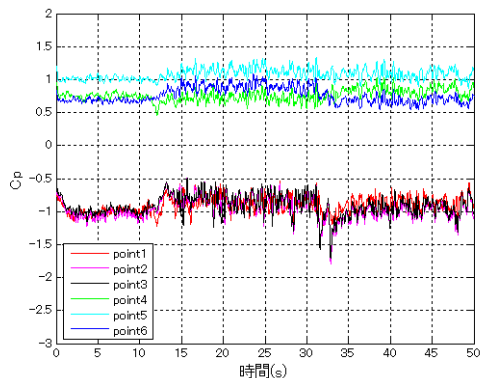


図 5.42 NUD7_2sec_0° の C_p 時刻歴

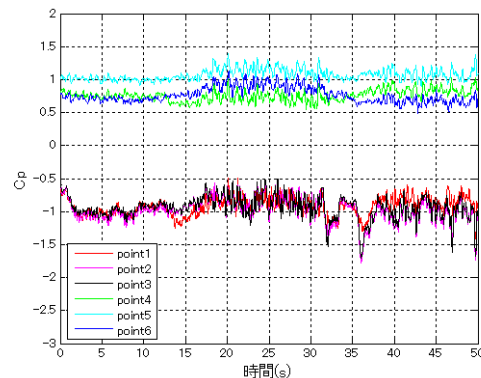


図 5.43 NUD7_6sec_0° の C_p 時刻歴

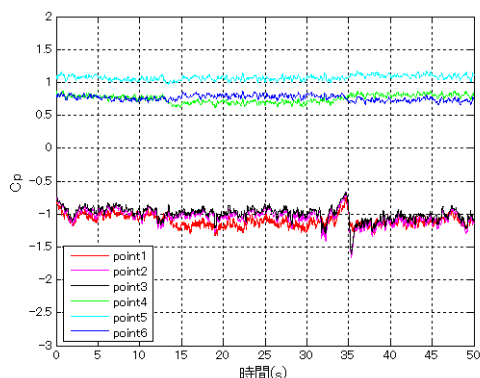


図 5.44 NUD5_4sec_0° の C_p 時刻歴

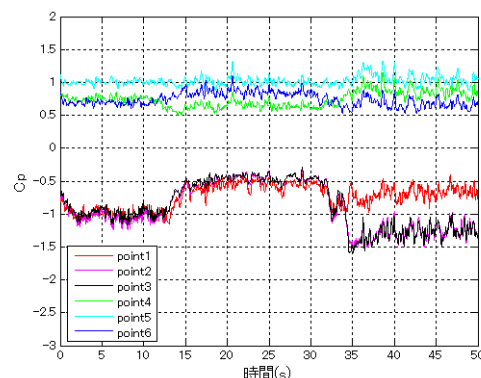


図 5.45 NUD10_4sec_0° の C_p 時刻歴

このように、確かに大きな負圧が確認はされているが、類似した計測で同様の結果が得られない以上、この負圧が出た原因が風向の変化にあるとは言い難い。ここで、風圧係数の動きに着目すると、模型正面部の風圧係数の変化が比較的なだらかなのに対し、模型側面、背面の風圧係数は不自然で、かつそれぞれの測定点が似たような動きをしている。

このような現象の原因として、風圧係数の計算式(5.4 式)において、基準として用いている風速や静圧が正しく場を代表していないことが一つの理由として考えられる。すなわち、静圧や風速は模型正面部のものを代表しているが、模型側面や背面のものとは異なっていると考えられる。あるいは、もう一つ考えられることとして、模型の各点に作用する風向が、それぞれで異なっているという可能性がある。

いずれの場合にせよ、これらの推定が正しいとすると、基準とする値を圧力の測定点の各点それぞれの位置における静圧、風速、風向をそれぞれの位置を正しく代表するものとして別々に用いることで、本実験で得られた不自然な風圧係数の動きは打ち消されるものと考えられる。すなわち、5.4 式を拡張し、

$$C_p(x, t) = \frac{p'(x_k, t) - p_s(x_k, t)}{\frac{1}{2} \rho U_R(x_k, t)^2} \quad (5.12)$$

とすることで、5.3.3 で求めたように、風向との関係から風圧係数を求めることが出来ると予想される。

しかし、静圧や風速が部分ごとに異なっていると考える場合、風圧係数の運用法から考えると、5.12 式のように測定点ごとに基準値が異なるというのは実用的とはいえない。すなわち、図 5.46 のように建物全体（風力）、あるいは建物の部分の応答を考えると、正面部と背面部あるいは外側と内側の圧力の差が支配的な要因となる。この場合、同一の基準でなければ計算を行うことは困難である。よって、基準は同一のものをいねばならないため、5.12 式は用いることはできない。

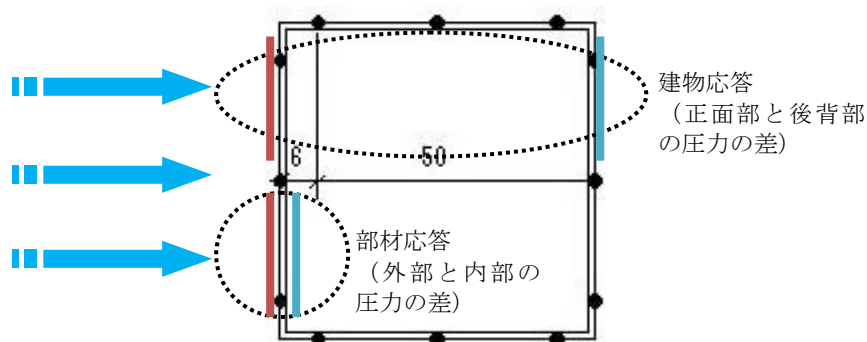


図 5.46 構造体、各部材に作用する風力

よって、**図 5.41** で風力係数においても非定常な風向変化時にピークが見られるように、風が非定常な挙動を示す場合には、定常的な考えの下には見られない圧力の変動が起きるといえる。

また、建物の各部分に作用する風向がそれぞれ異なっていると考える場合にも、建物全体の応答という点でみると、定常的な考え方とは大きく異なってくる場合が考えられる。例えば、**図 5.30** から **図 5.36** をみると、建物の1面に対してかかる圧力が最も大きくなるのは0度の時、最も小さくなるのは80度の時であるが、非定常変化時に建物の各面ごとに作用している風向が異なっていると考える場合、**図 5.47** のように、瞬間的にはそれぞれの面に対して作用していると考えられる風向が異なっていると考えられる可能性がある。このような場合には、各面に作用する風圧力はそれぞれの風向の時の数値を上回ることはないが、全体に作用する風力は通常時より大きくなると考えられる。本実験では最大の平均風力係数 C_{FX} は約2であったが、**図 5.47** のような場合、平均風力係数は約2.5程度まで大きくなると考えられる。このような状況は矩形断面に限らず、あらゆる断面形状で起きうると考えられる。

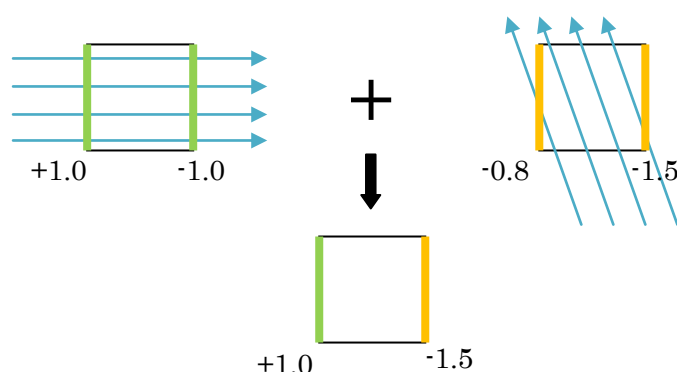


図 5.46 風向の作用する面の非同一性

これらの推論を確かめるためには、風洞内部の静圧の分布の様子をより詳細に測定する必要があると考えられる。風洞内の各部分の静圧、風速、風向をより細かく測定した上で、風圧係数に及ぼす影響を論じることが必要であろう。

ただし、いずれにしてもこのような各部分での風向や静圧の違いは、ファンによって圧力勾配を発生させる風洞内部において保証されるものであり、自然風中で風速や風向が変化する場合に、どのような圧力場が形成されているか明らかにしなければならない。非常に困難なことであると考えられるが、自然風中の静圧の変化を風速や風向の変化とともに測定する必要があるといえる。

-第6章-
総括

6.1 結論

本章では、各章にて得られた知見、成果をまとめる。

第1章では、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。

第2章では、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であることを確認し、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。

第3章では、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。

第4章では、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、ファンへの入力が入力が **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洞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、3 章にて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。

第 5 章では、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、3 章にて作成した気流の下で圧力測定実験を行った。その際、2 章、3 章及び 4 章にて得た知見に基づき、最適な実験方法について考察した。

まず、3 章で作成した気流 str5 , str7 , str10 のそれぞれの定常状態 N , D , U について、円柱模型の設置角度を 0 , 11.25 度と変化させて測定した。また、角柱模型の設置角度を 0 , 5 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 35 , 40 , 45 度と変化させて測定した。その結果を設置角度と風向ごとにまとめ、円柱模型の測定結果から模型設置時の N , D , U の作用風向と数値についての補正値を求めた。また、それぞれの測定結果と、1 列複数ファン風洞における測定結果、境界層風洞における測定結果、あるいは理論値と比較し、実験の妥当性を確認した。

次に、3 章で作成した非定常風向変化気流 NDU5 , NUD5 , NDU7 , NUD7 , NDU10 , NUD10 のそれぞれで、変化時間 2 , 4 , 6 , 8 , 10 秒、模型の設置角度を $0\sim 45$ 度の範囲で変化させ、合計 300 パターンについて計測を行った。その結果、1 列複数ファン風洞にて観測された不自然なピークなどは今回の実験では観測されなかったことで、改善した実験手法が有用であると示した。また、風向変化を含む非定常な現象が建物の応答に与える危険性について言及した。ここに、実験の有用性を確認したことで目的 3) を達成した。

6.2 今後の展望

ここでは本研究から得られた知見に基づき、今後の展望について私見を述べる。

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、及び時間的变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^{*6-1}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 4)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

参考文献

- [1-1] 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
- [1-2] 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
- [1-3] 瀧山, 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
- [1-4] Nishi, A., Kikugawa, H., Matsuda, Y. & Tashiro, D. : Turbulence control in multiple-fun wind tunnels, J. Wind Engi and Industrial Aero 67 (1997) 861
- [1-5] 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)
- [1-6] 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
- [1-7] 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
- [1-8] 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
- [1-9] 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
- [1-10] 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
-
- [2-1] 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
- [2-2] 同[1-7]
- [2-3] 同[1-8]
-
- [3-1] 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
- [3-2] 同[1-8]
- [3-3] 同[1-9]
- [3-4] 同[2-1]
-
- [4-1] 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

[4-2] 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

[4-3] 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

[5-1] 同[1-9]

[5-2] 同[4-2]

[5-3] 同[3-1]

[5-4] 同[1-10]

[6-1] 同[1-2]

付録

1 列複数ファン風洞の概要

ここでは、3 列複数ファン風洞の前身となった、1 列複数ファン風洞について説明する。本研究においては 1 列複数ファン風洞を用いた実験を行っていないが、3 列複数ファン風洞の性能評価のため、3 列複数ファン風洞における実験結果と 1 列複数ファン風洞にて過去に行われた実験の結果との比較を行っている。

風洞概要

1 列複数ファン風洞は、上流端に 6 個のファンが縦列された吹き出し式風洞である。全長が 6.0m、測定胴部が 3.6m であり、その断面は、幅 0.2m×高さ 0.6m となっている。図面を図 3.1 に示す。ファンから測定胴への流路は 5/9 の断面比で縮流され、気流のねじれを防ぐ整流格子が挿入されている。トラバースは測定胴上流端から 1,100mm、2,200mm、3,300mm の位置に設置することができる。また、トラバースに取り付けられるプロブサポートはトラバースの位置から風洞測定胴上流方向に約 300mm の範囲で自由に動かすことが可能となっている。

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 3.2 に示す。AC サーボモータには YASKAWA サーボモーターSGM01B312 を、小型ファンには EBARA 大静圧 2 段羽タイプ MRW18BTA を採用した。AC サーボモータは加減速度が大きく位置決め時間が短縮できるので、応答性が良く速度制御範囲が比較的広いという特色を持つ。また、各ファンの回転数は 0~3,000rpm の範囲で、それぞれ独立に制御することができる。



図 1 列複数ファン風洞外観

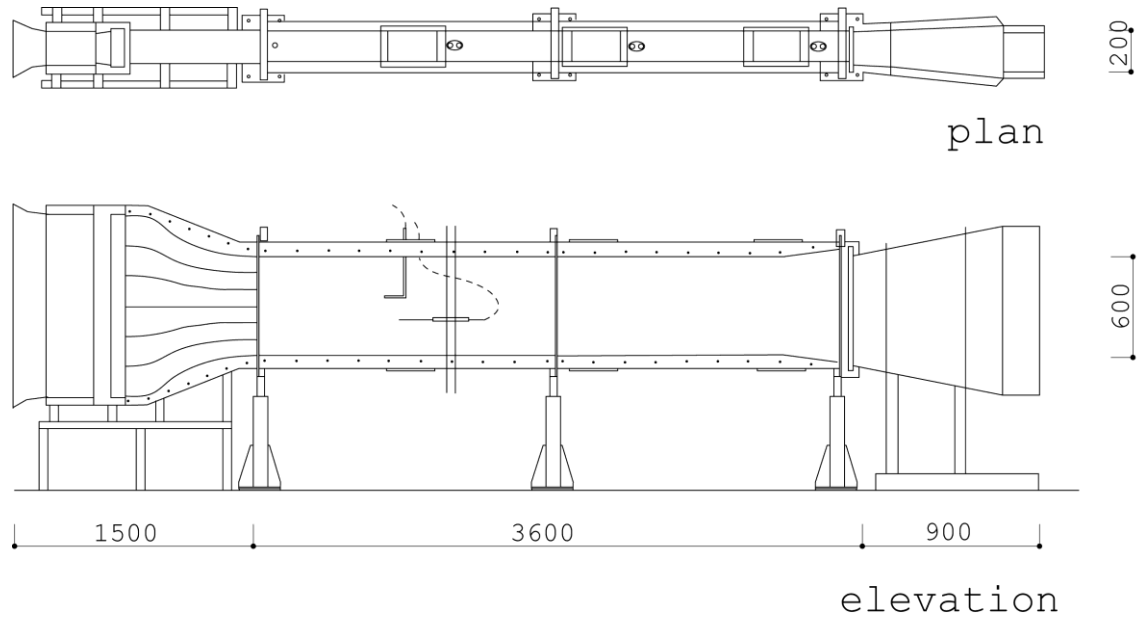


図 複数ファン風洞図面

表 複数ファン風洞諸性能

風洞	
風洞全長	6,000mm
測定胴全長	3,600mm
測定胴断面	高さ 600mm 幅 200mm

ファン	
形式	2段羽タイプ
直径	180mm
最大風量	11.2m ³ /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

エッフェル型境界層風洞

本研究では、3列複数ファン風洞における実験の特徴を比較するために、建築関連の風洞実験では広く利用されている境界層風洞を用いて実験を行う。ここでは、本風洞の紹介を行う。

境界層風洞の実験には、東京大学工学部建築学専攻風環境シミュレータ風洞を利用した。この風洞は室内閉鎖回流式エッフェル型境界層風洞であり、全長 29.5m、測定長部 15.6m、境界層長さ 12.5m、測定部断面は高さ 1.8m×幅 1.56m、最大風速は約 13m/sec である。大きなファンによって作られた風を長い距離を吹送させることで、縮尺率で 1/400 の気流を測定部に作り出すことができる。風洞の各機器の諸性能を表に示す。



図 境界層風洞内観

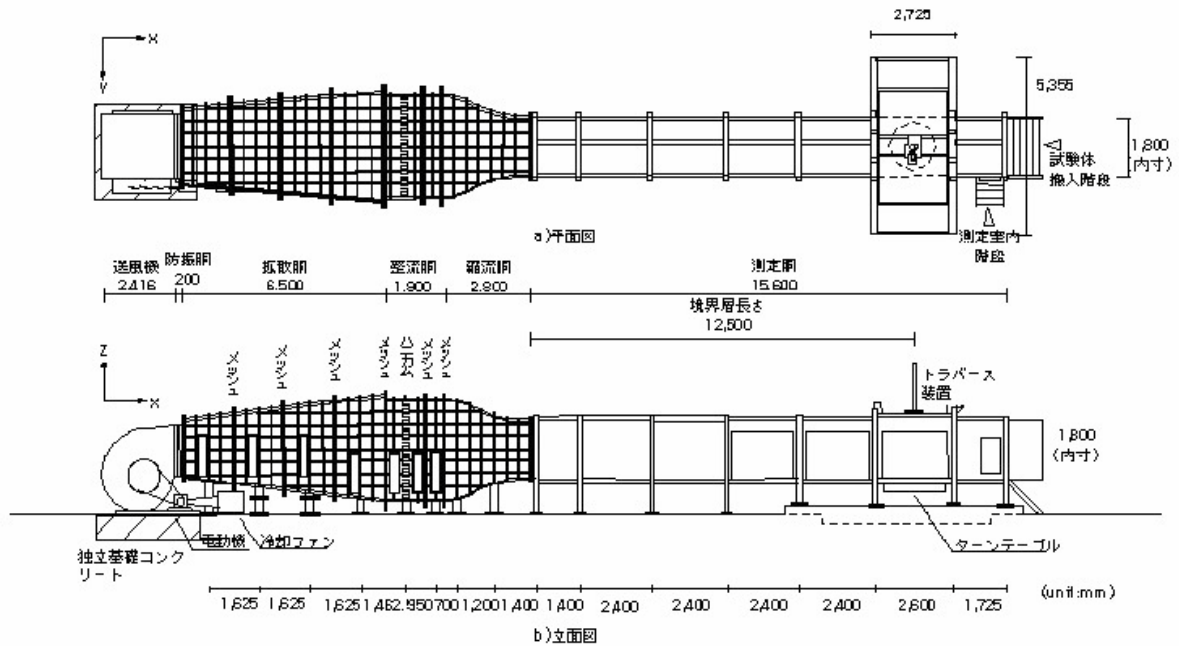


図 境界層風洞図面

表 境界層風洞諸性能

風洞		整流機器	
風洞形式	室内閉鎖回流式エッフェル型	整流格子 数量	整流胴部1着
風洞全長	29,500mm	型式	アルミニウム格子製
測定脚全長	15,600mm	型番	3/8 × 120mm
境界層長さ	12,500mm	整流金網 数量	拡散胴部3枚、整流胴部3枚
測定脚断面	高さ 1,800mm 幅 1,560mm	型式	ステンレス製メッシュ
縮流比	1/3.16	型番	寸法:メッシュ#20、素線径:0.274mm
風洞範囲	0.5m/s ~ 13m/s	ターンテーブル	
風速分布	±1.0%未満の一様性(10m/s)		
乱れ強さ	±1.7%未満の一様性(3m/s)		
	0.7%未満		
送風機		構造形式	
型式	両吸込型多翼ファン	駆動方法	遠隔自動旋回位置停止式手動上下昇降型
風量	約42.2m³/s	設置位置	ACサーボモータ
最大静圧	37.0mmAq	直径	12,500mm
回転数	240rpm - 約3,200rpm	可動範囲	1,600mm
電動機		最大速度	±360deg
型式	他力強制冷却型	トラバース装置	
出力	DC220V37.0kW	構造形式	外装型4軸遠隔自動位置停止式
基底回転数	1,150rpm	駆動方式	ACサーボモータ
制御回転数	40 - 1,050rpm	可動範囲	
制御装置	サイリスタ制御	X軸方向	±800mm
		Y軸水平方向	±800mm
		Z軸鉛直方向	0 ~ 1,000mm
		Z軸回転方向	±360deg

模擬気流の性状

実験は、粗度区分Ⅲ、粗度区分Ⅰに相当する乱れを持つ気流、及び一様流下での実験を行う。

境界層内の鉛直風速分布として実用的に用いられている式

$$U(z) = U(z_1) \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha$$

$U(z)$: 高さ z における平均風速

z_1 : 基準高さ

α : 地表面粗度に応じて定まるべき指数

において、I.S.O や日本建築学会(1993)の提案に従ってべき指数を決定し、それに応じた地表面粗度をスパイヤ、ソウ、及びラフネスブロックを用いて作成した。

具体的には、粗度区分Ⅲでは $\alpha=0.24$ と設定し、Counihan タイプのスパイヤ、150mm 高さのソウ、30mm×30mm のラフネスブロックを用い、粗度区分Ⅰでは $\alpha=0.12$ と設定し、Counihan タイプのスパイヤ、100mm 高さのソウ、10mm×10mm のラフネスブロックを用いた。また、境界層の性状を調べるためにソウの高さを 100mm ずつ上げて実験を行った。

なお、本実験では模型頂部の平均風速を代表風速とし、約 4.0m/s となるように機器回転数を調整した。また、模型の縮尺率を 1/400、時間の縮尺率を 1/70 としたため、風速の縮尺率は $(1/400)/(1/70)=1/5.7$ となる。



図 ラフネスブロック

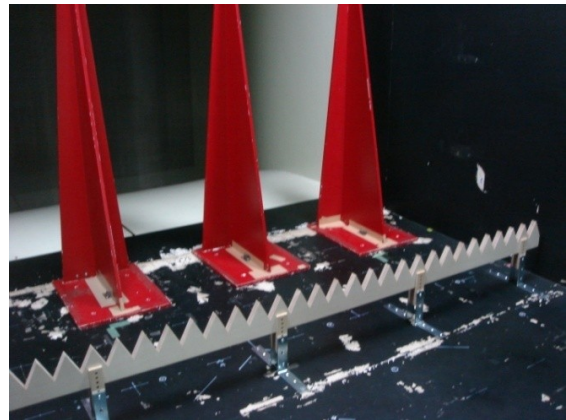


図 スパイヤ・ソウ

作成した風向変化気流の時刻歴データ

3章における実験にて作成した気流については表 3.8 にまとめてあるが、ここでは作成した気流で3章では載せられなかったものを載せる。具体的には、NDUの順序の変化の変化時間が4秒、6秒、8秒のもの、及びNUDの順序で変化するもの全部である。なおNDUの順序で2秒、10秒の変化時間のものは3章にて載せてある。

表 3.8 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

NDU5 4sec 変化

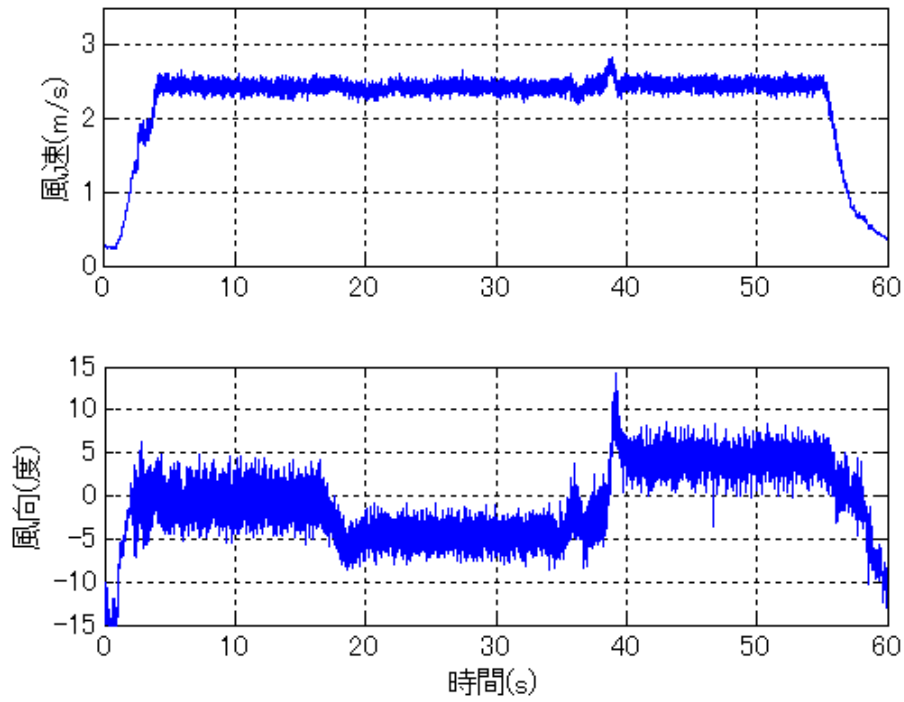


図 NDU5 で 4 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

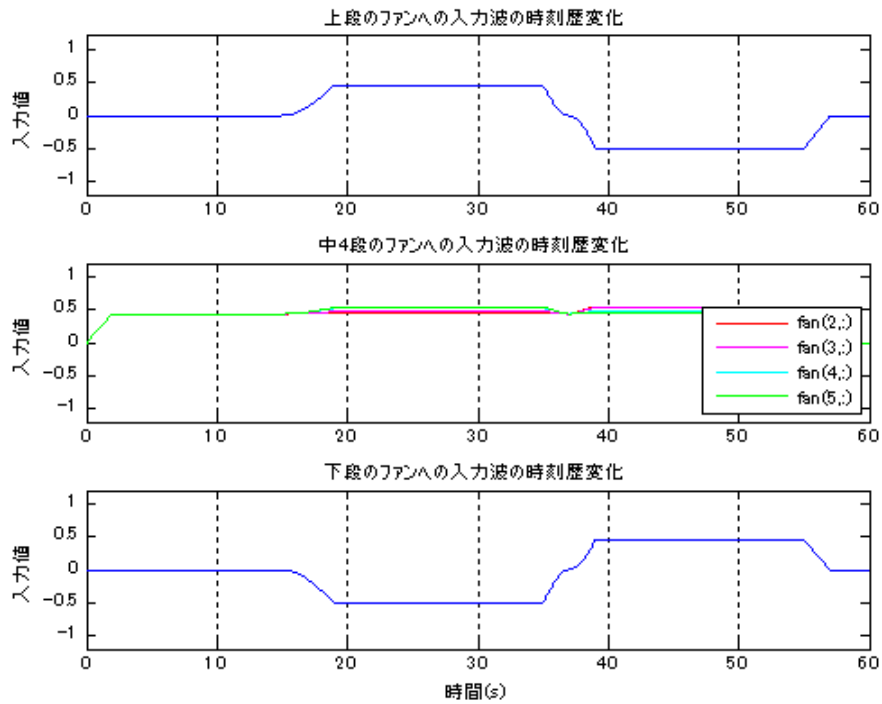


図 NDU5 で 4 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

NDU5 6sec 変化

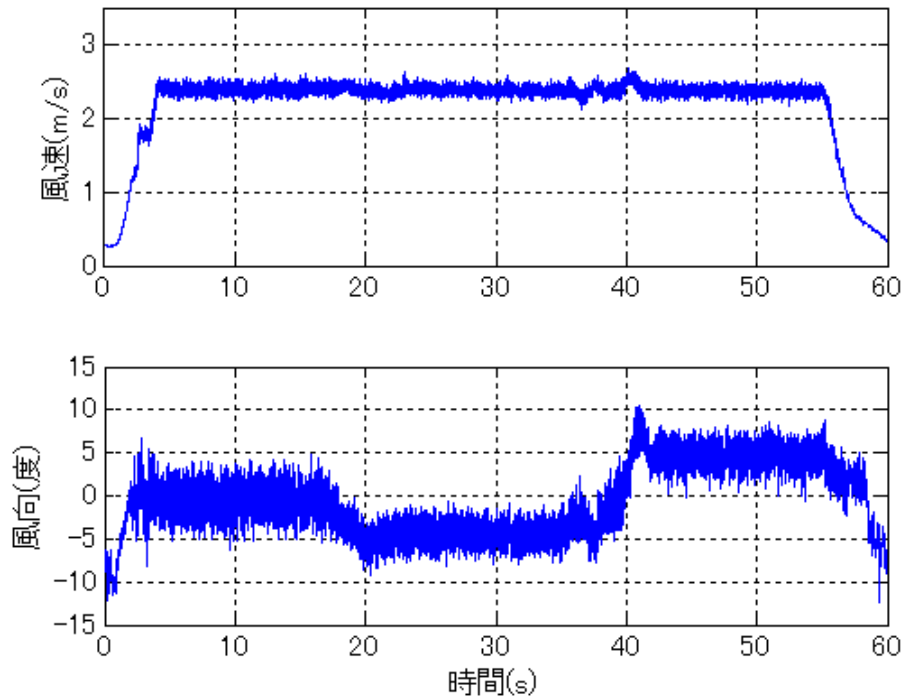


図 NDU5 で 6 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

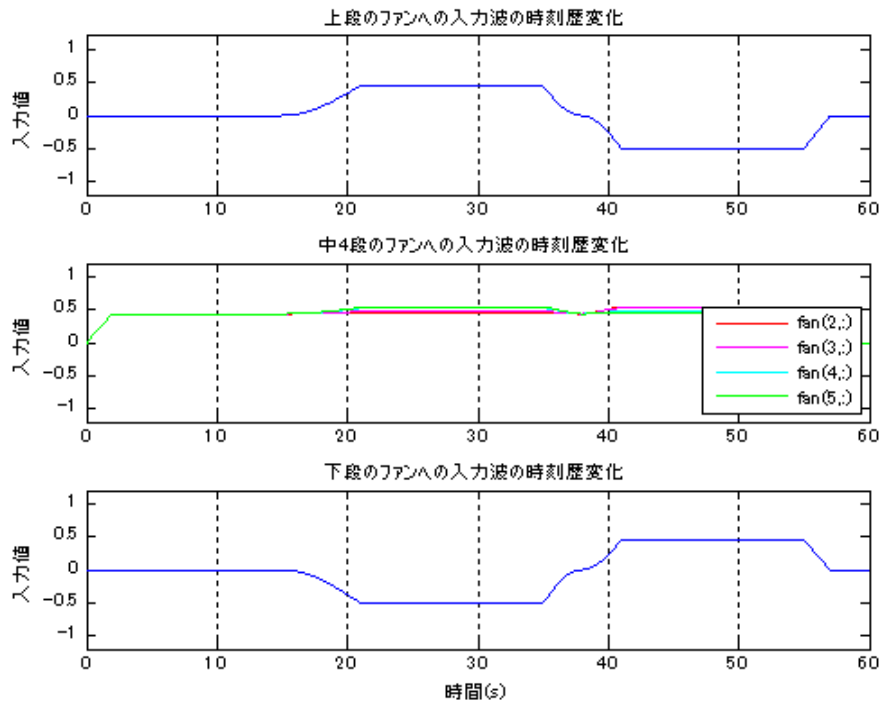


図 NDU5 で 6 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

NDU5 8sec 変化

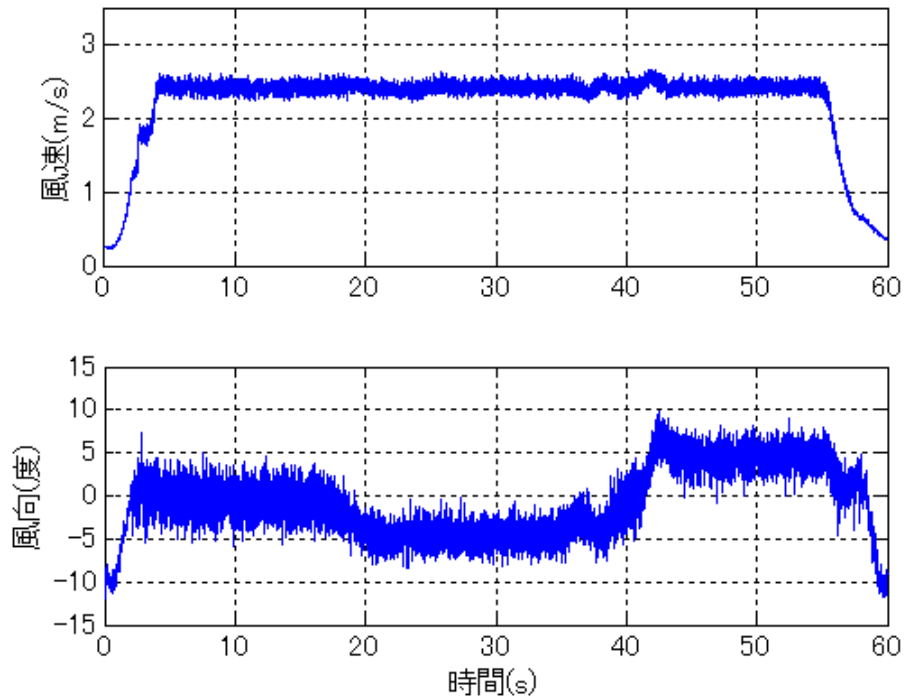


図 NDU5 で 8 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

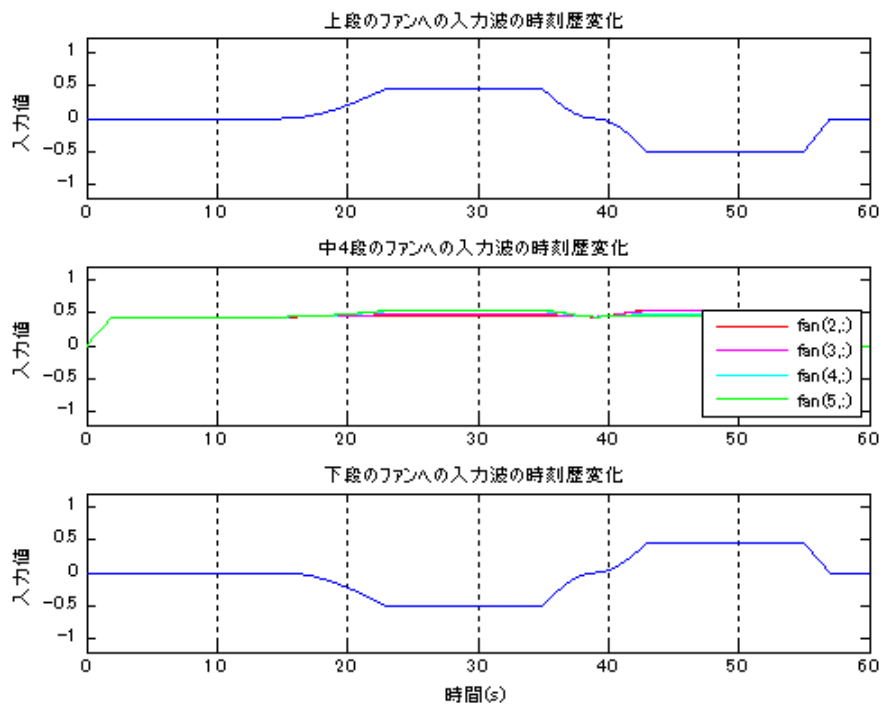


図 NDU5 で 8 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

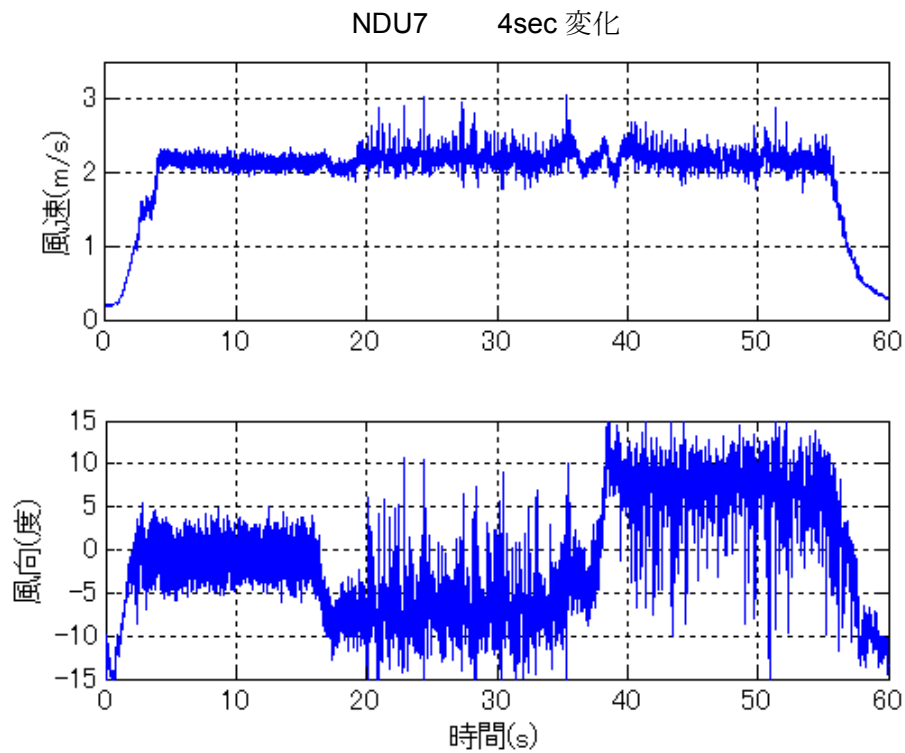


図 NDU7 で 4 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

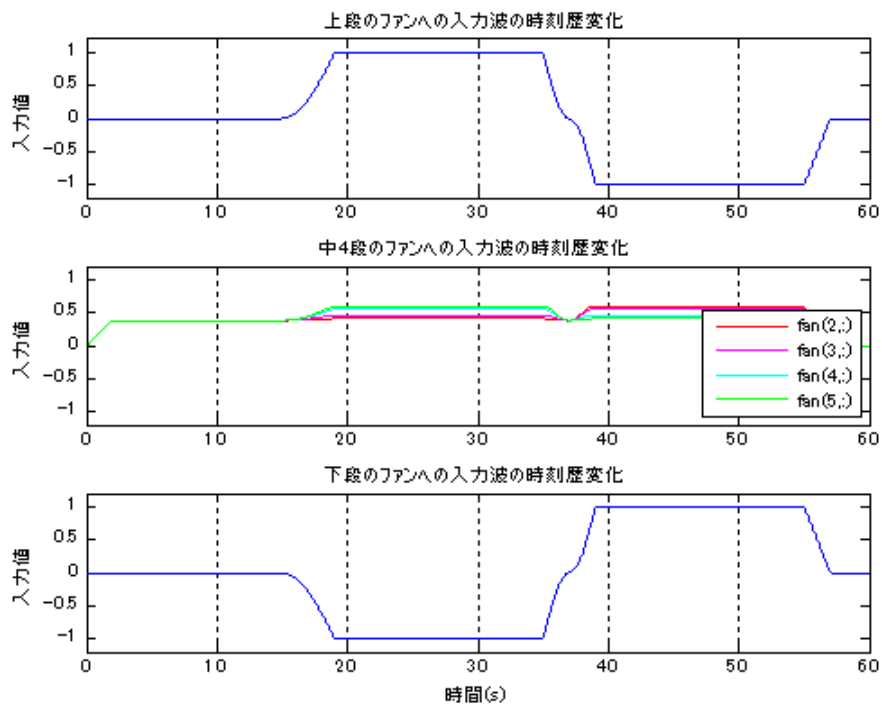


図 NDU7 で 4 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

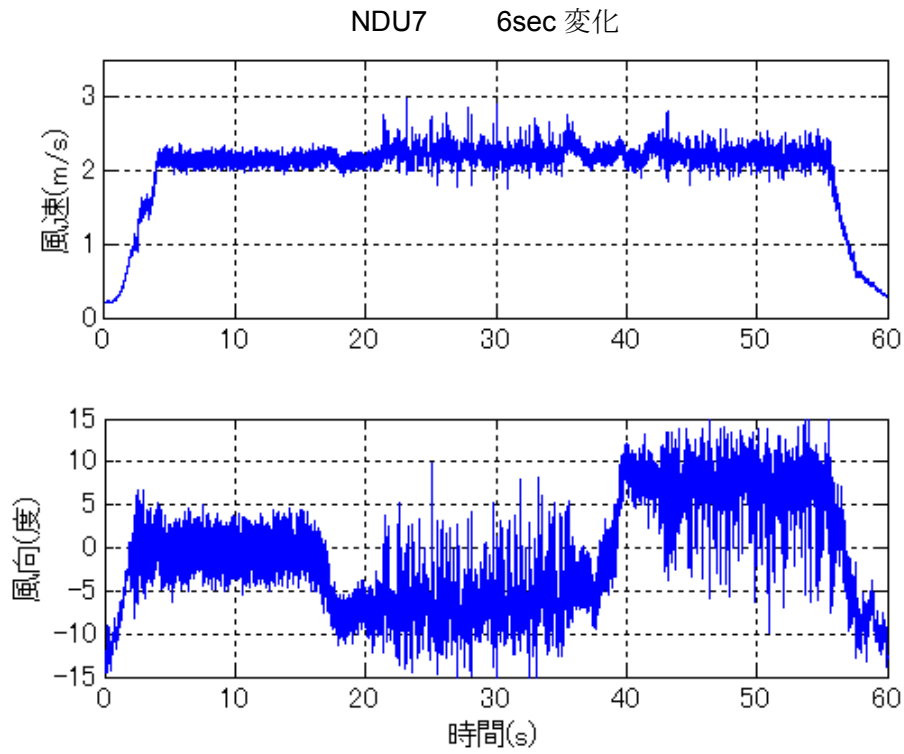


図 NDU7 で 6 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

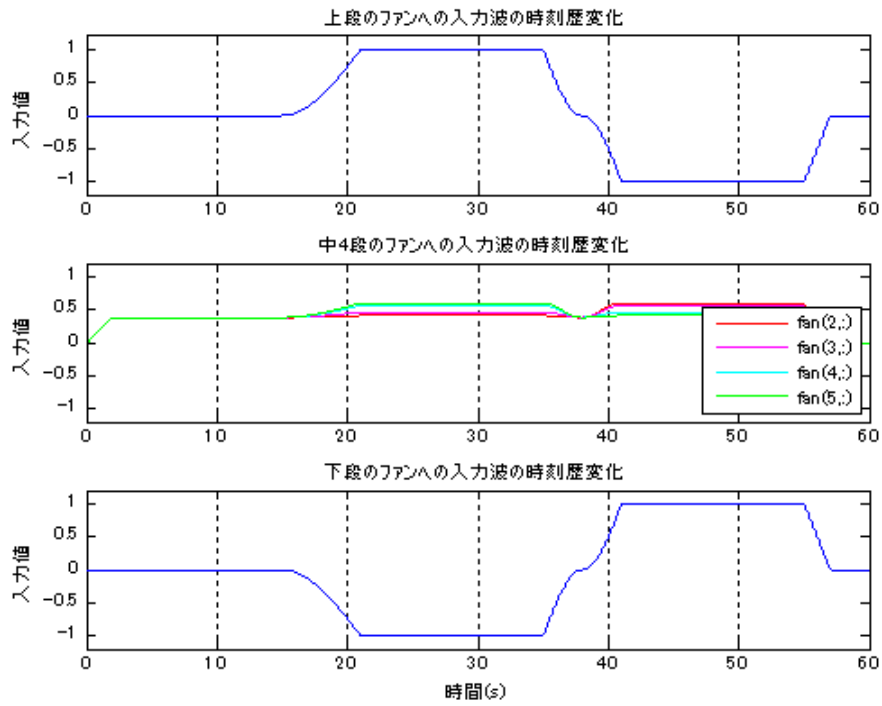


図 NDU7 で 6 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

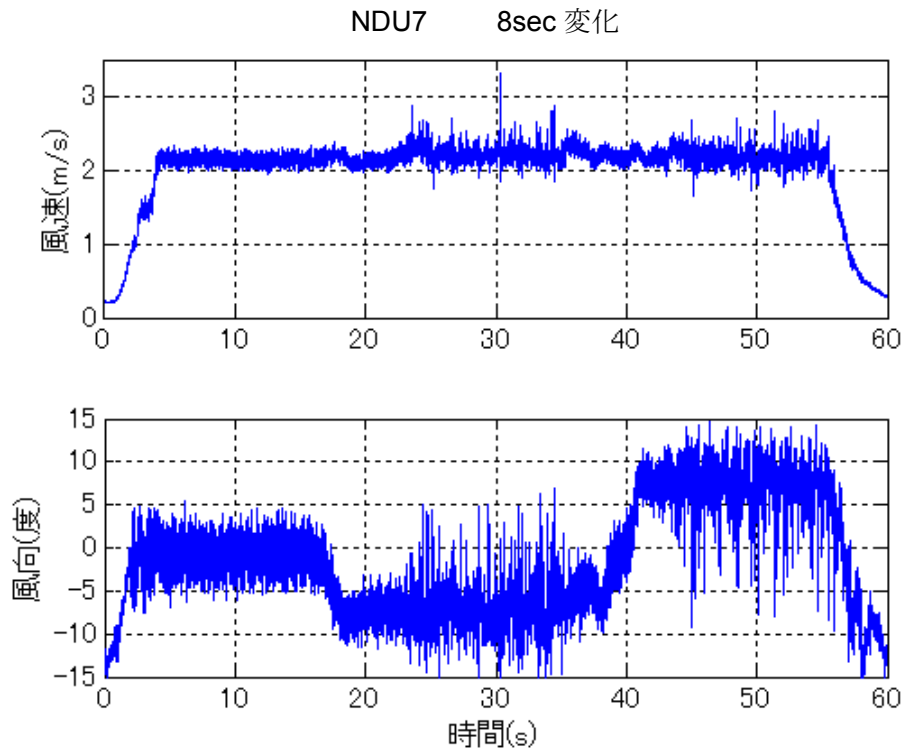


図 NDU7 で 8 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

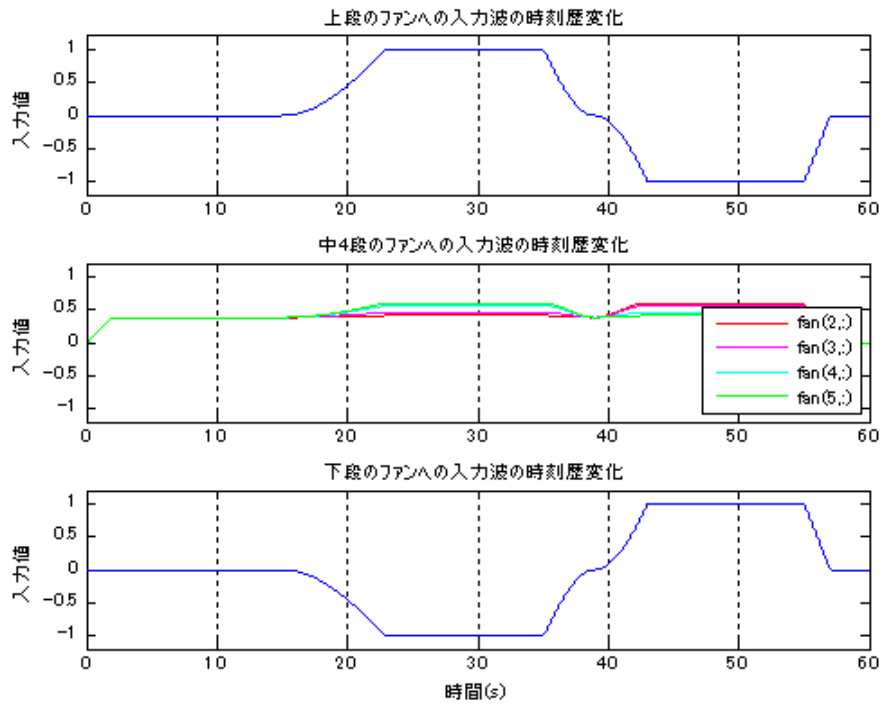


図 NDU7 で 8 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

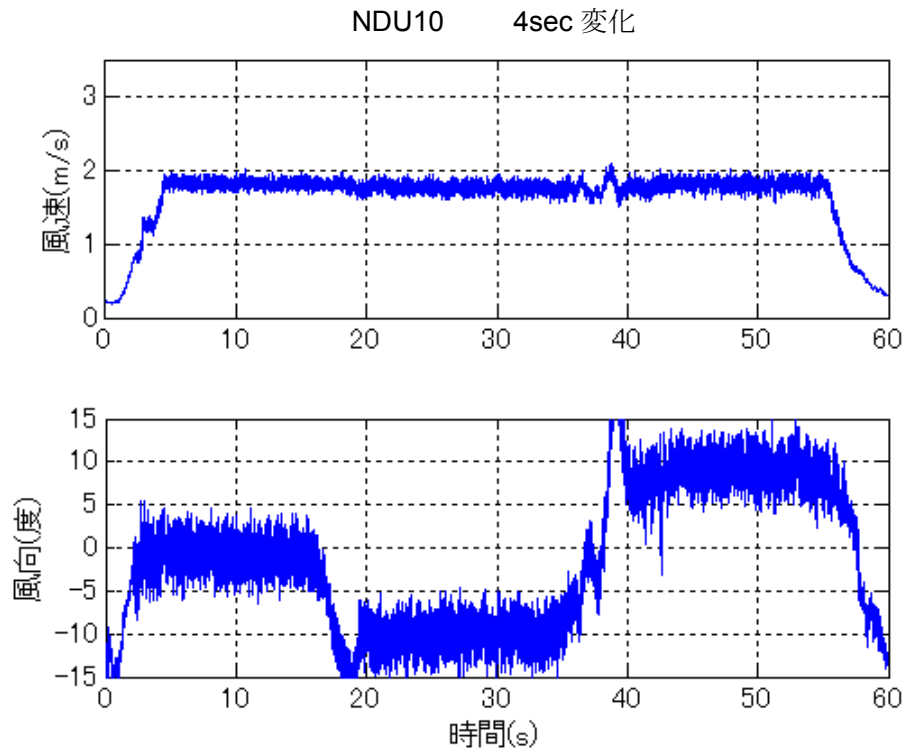


図 NDU10 で 4 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

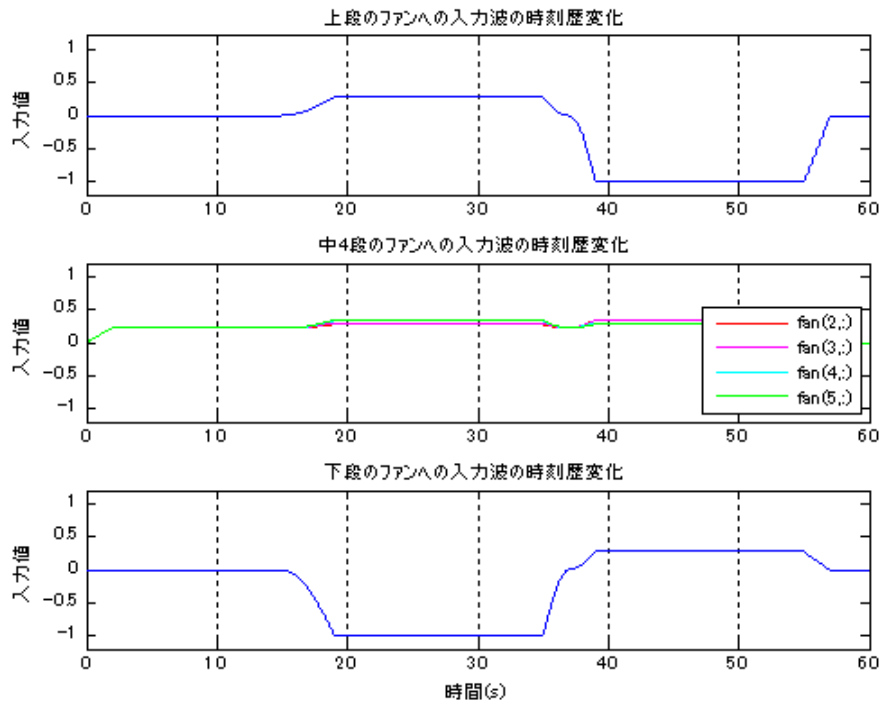


図 NDU10 で 4 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

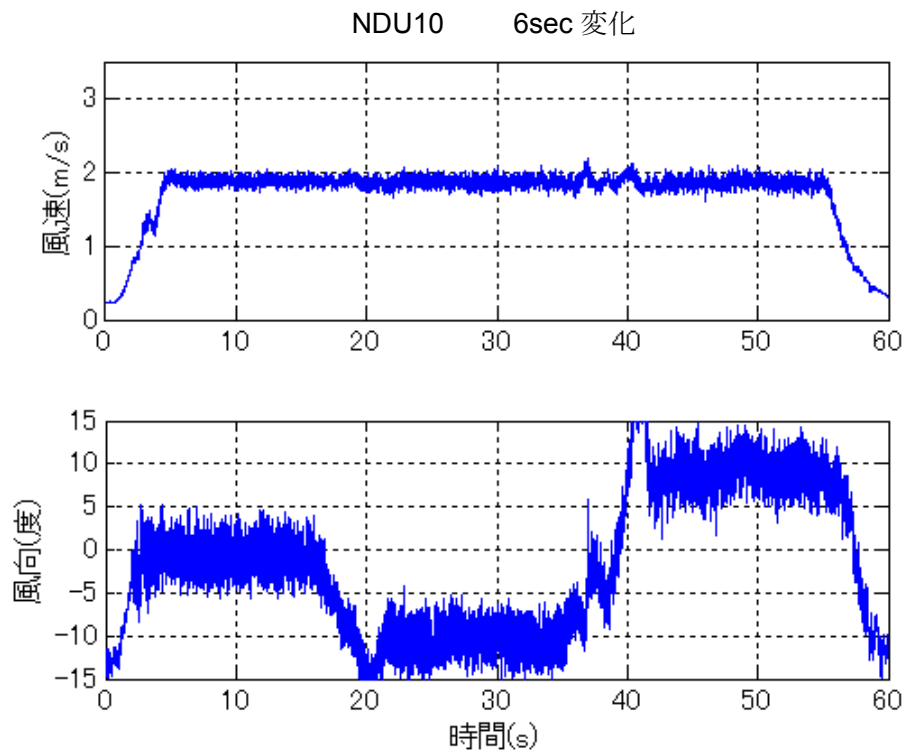


図 NDU10 で 6 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

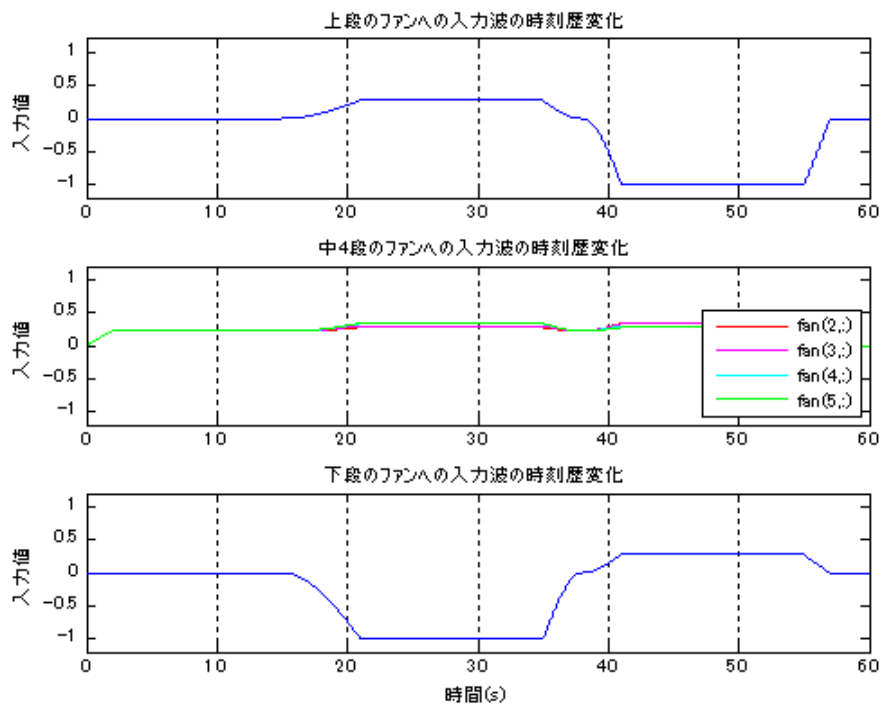


図 NDU10 で 6 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

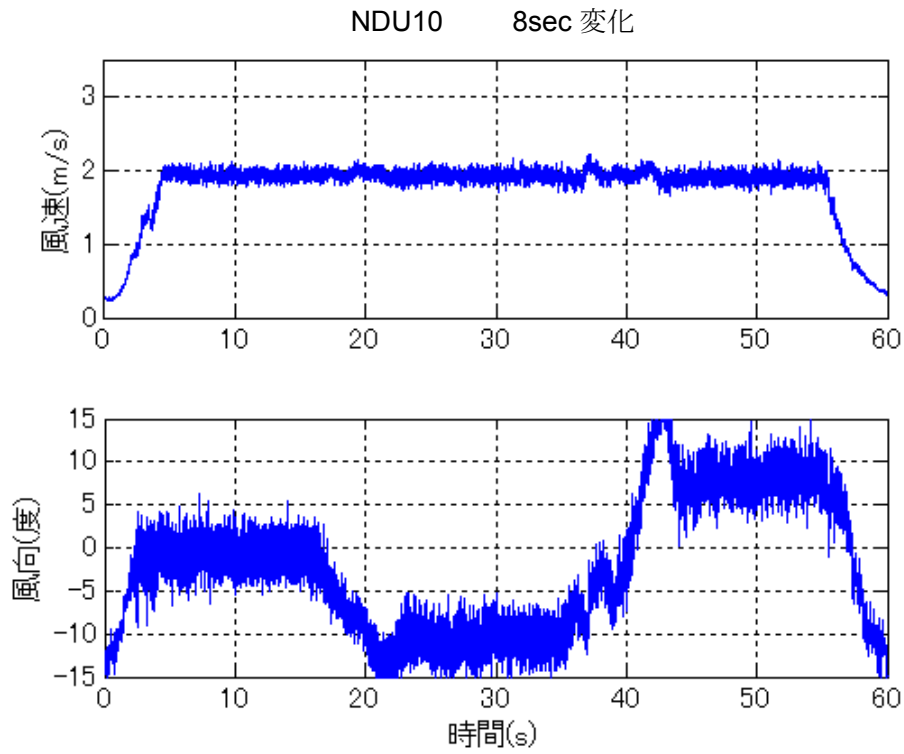


図 NDU10 で 8 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

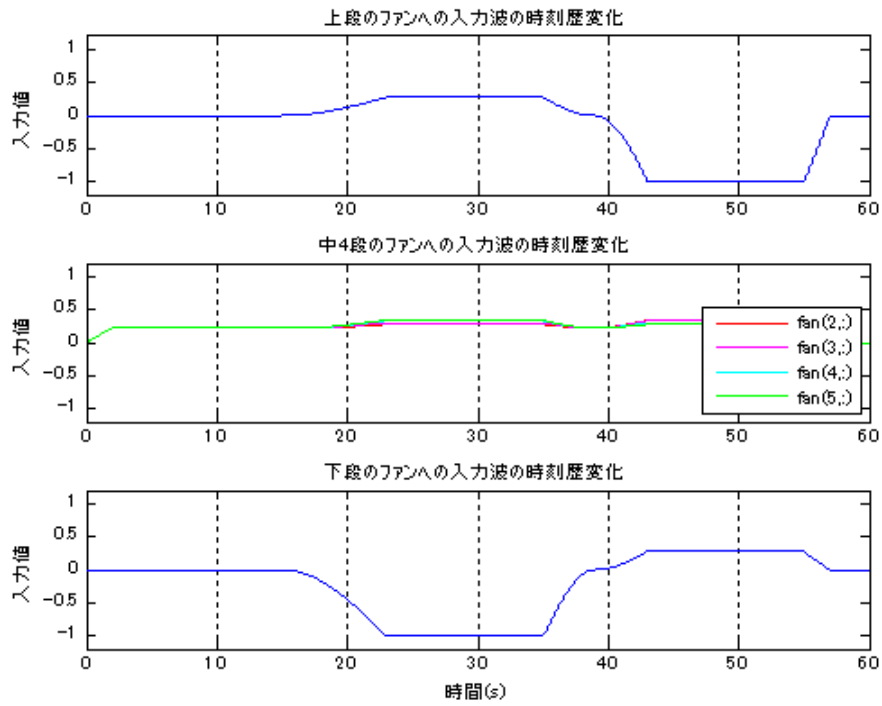


図 NDU10 で 8 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

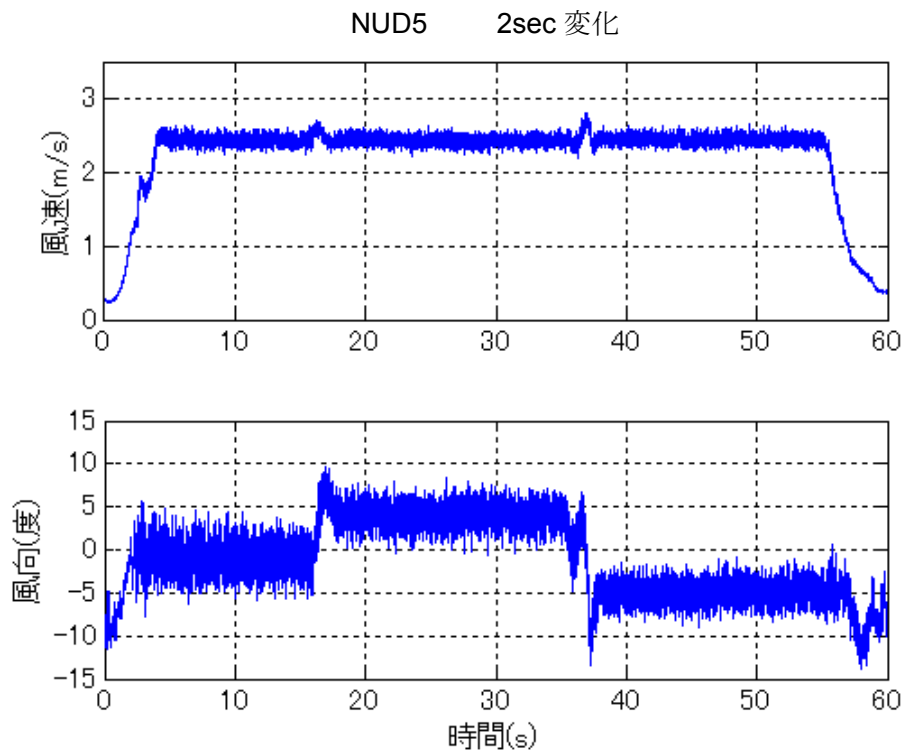


図 NUD5 で 2 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

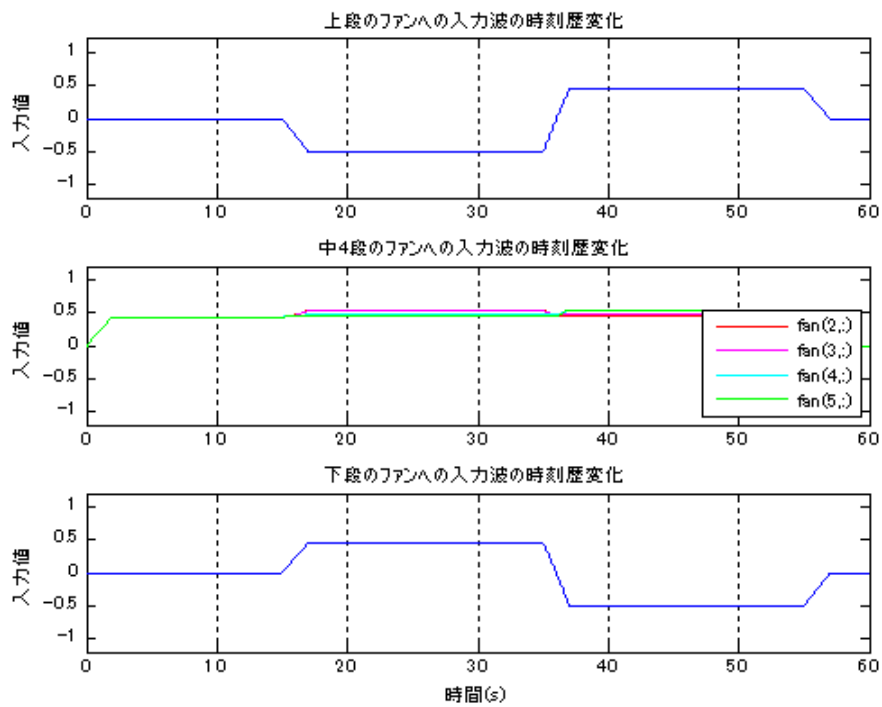


図 NUD5 で 2 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

NUD5 4sec 変化

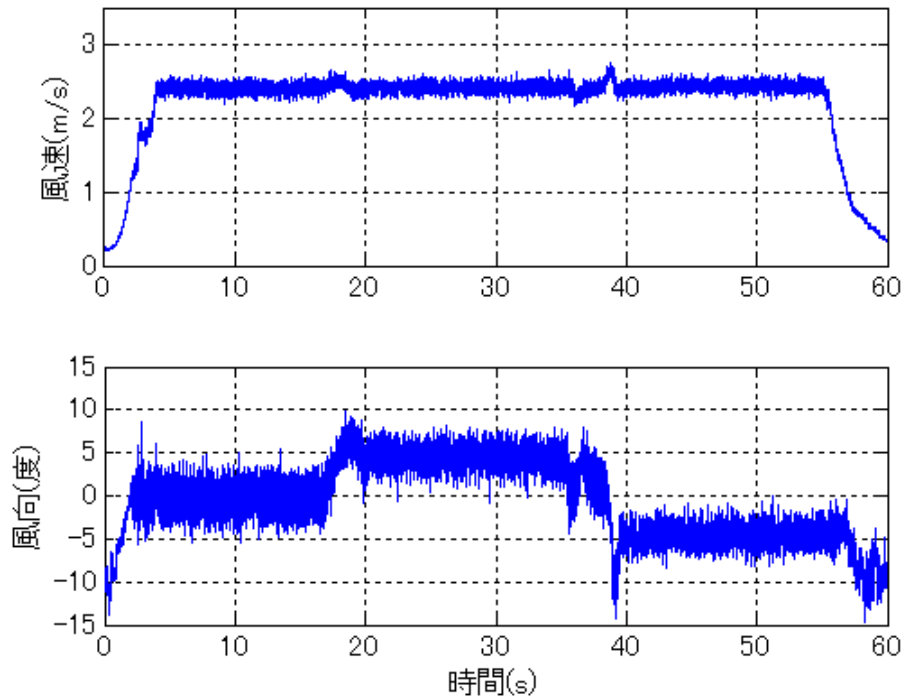


図 NUD5 で 4 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

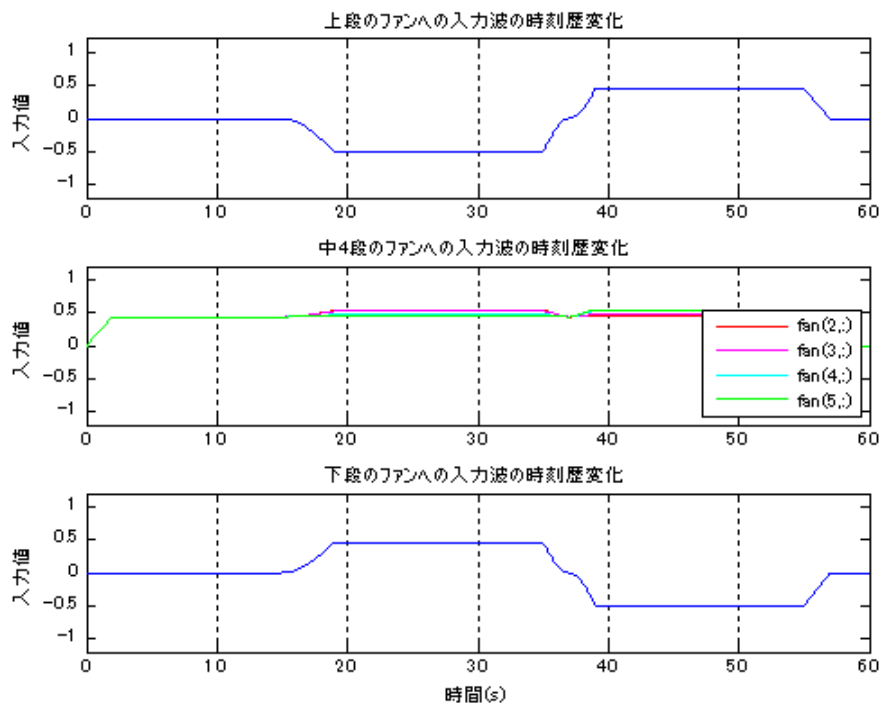


図 NUD5 で 4 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

NUD5 6sec 変化

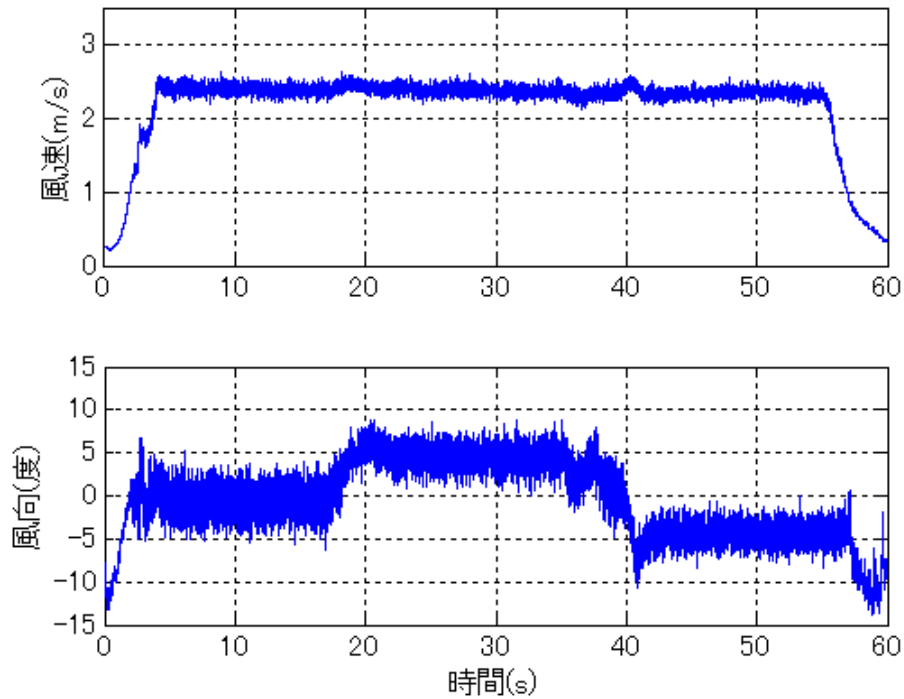


図 NUD5 で 6 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

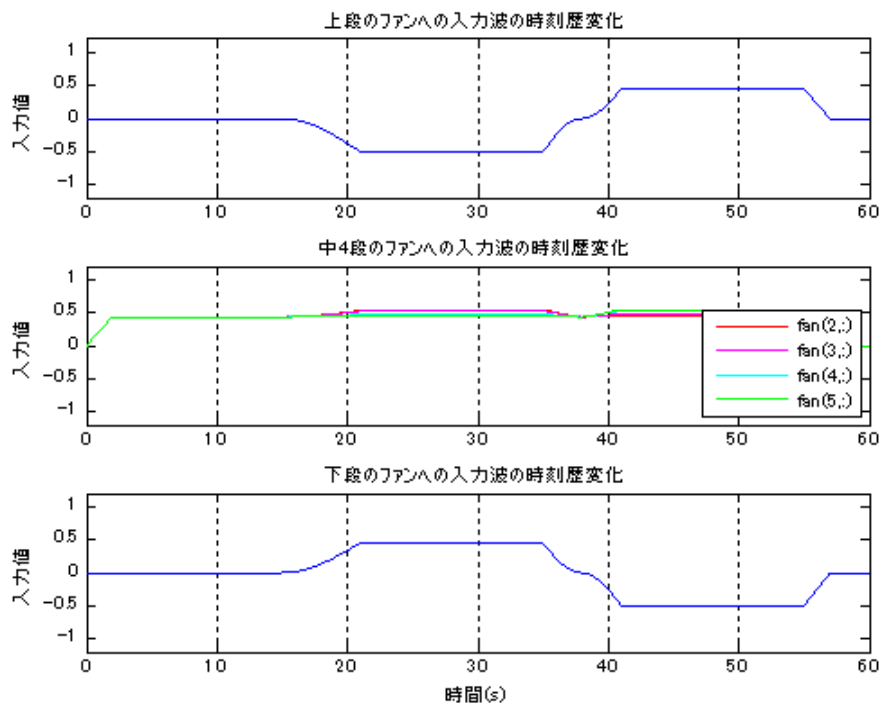


図 NUD5 で 6 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

NUD5 8sec 変化

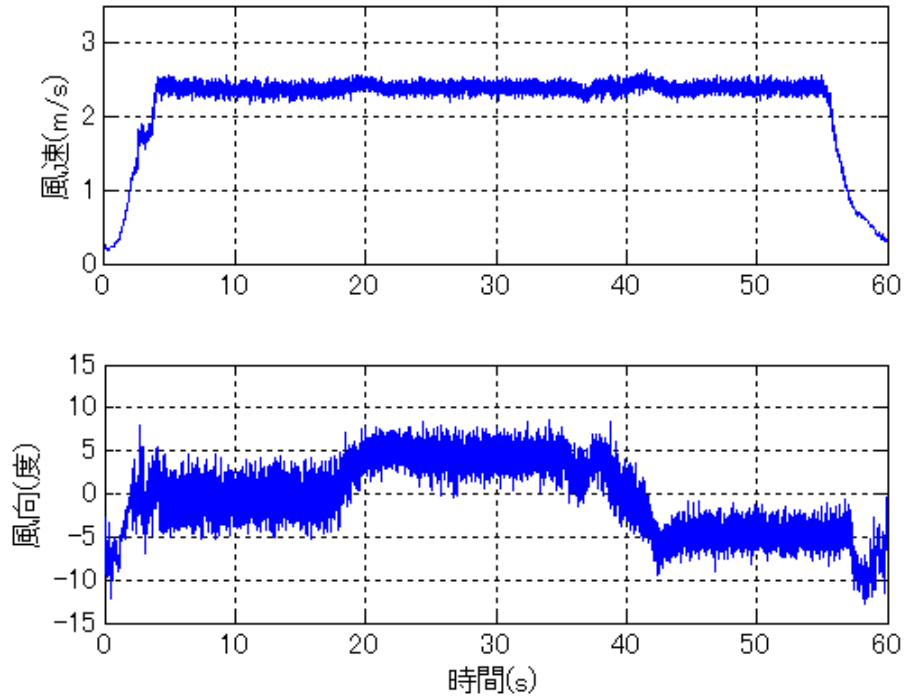


図 NUD5 で 8 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

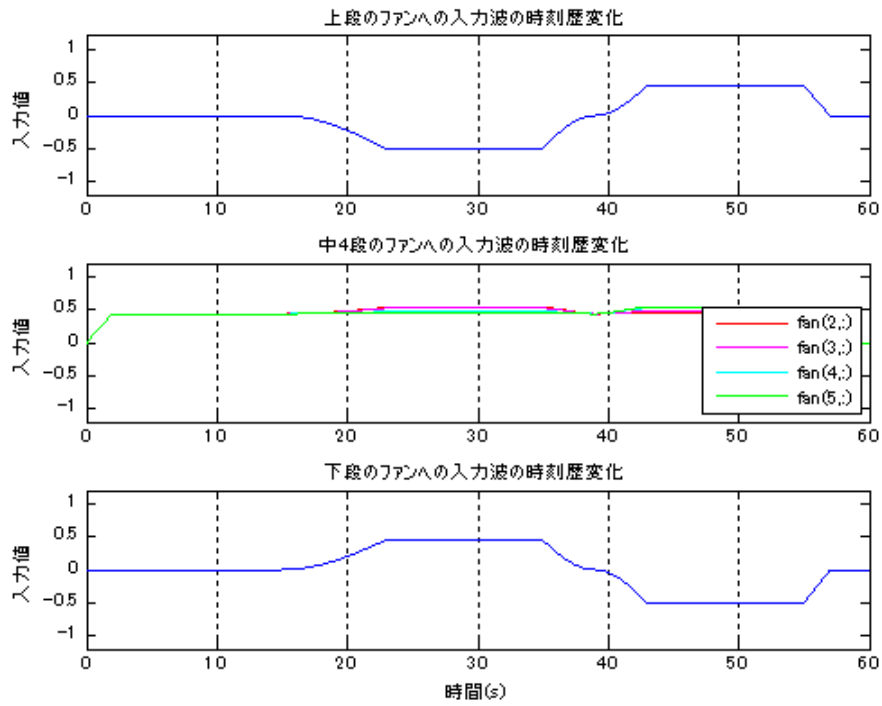


図 NUD5 で 8 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

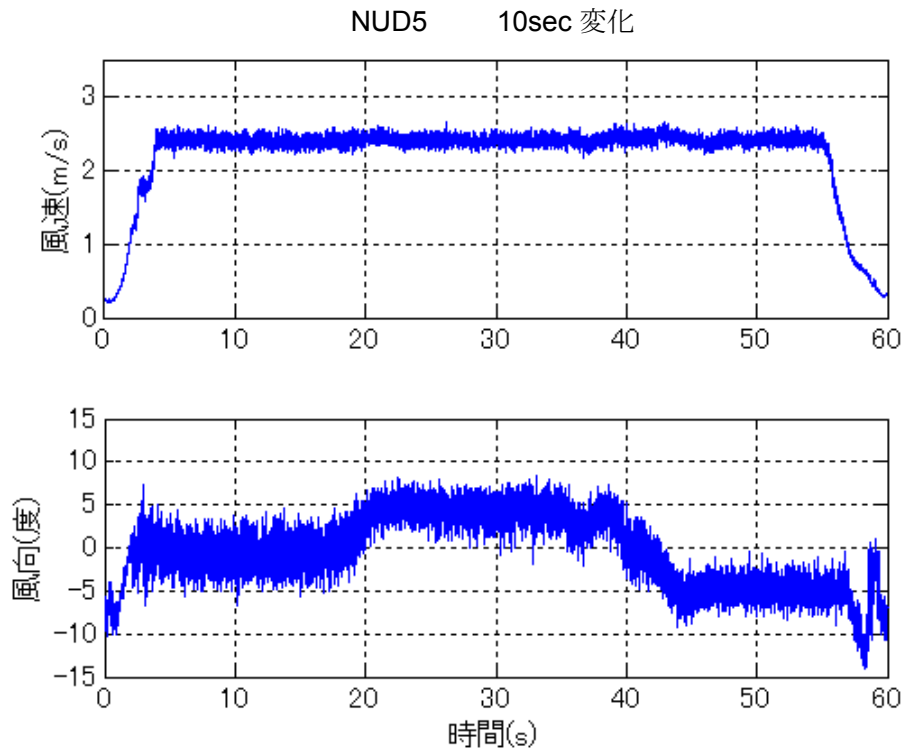


図 NUD5 で 10 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

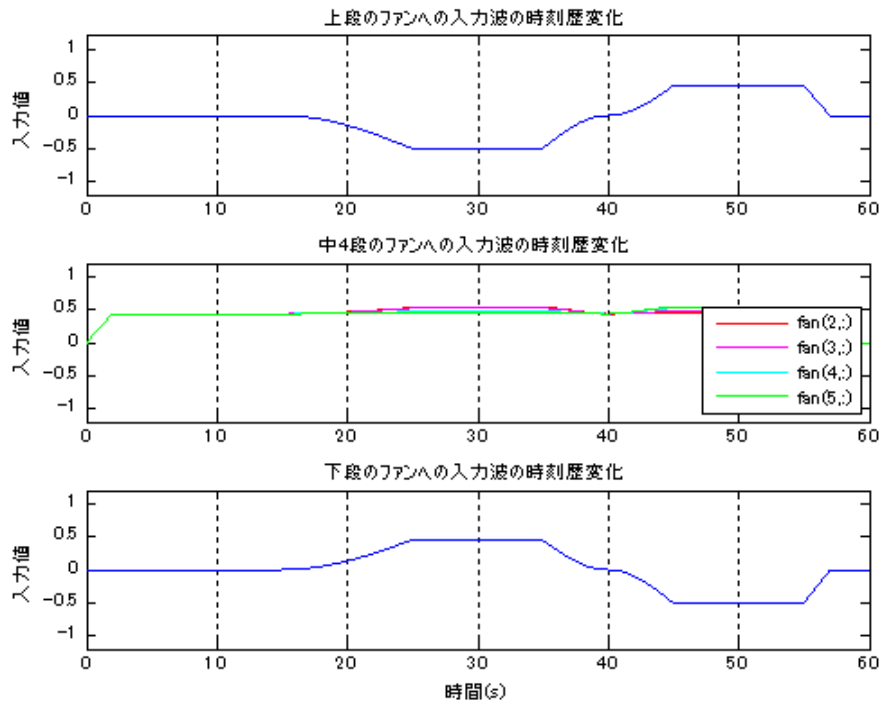


図 NUD5 で 10 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

NUD7 2sec 変化

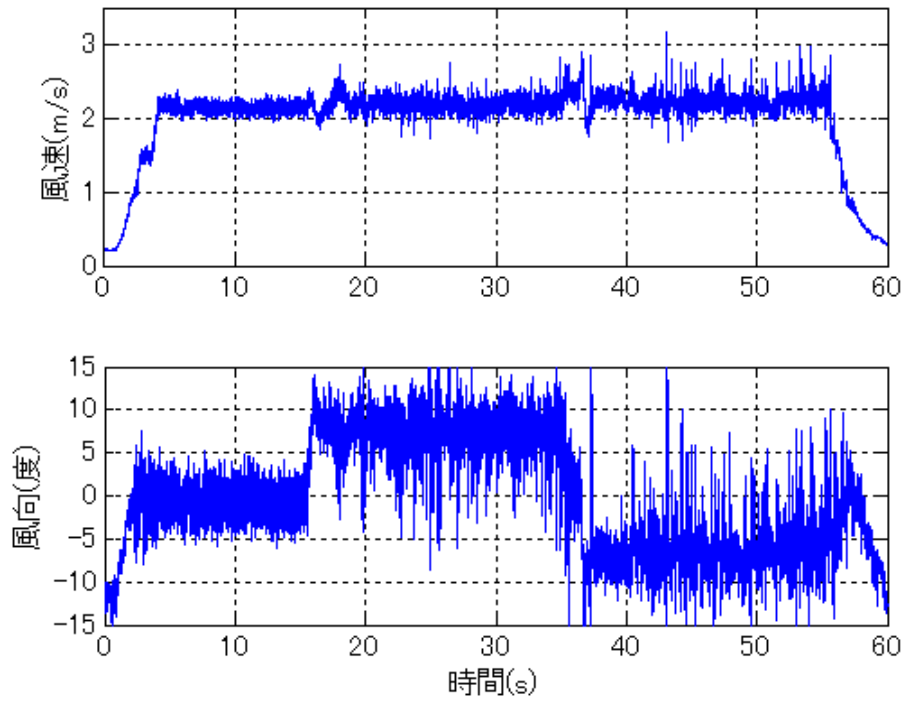


図 NUD7 で 2 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

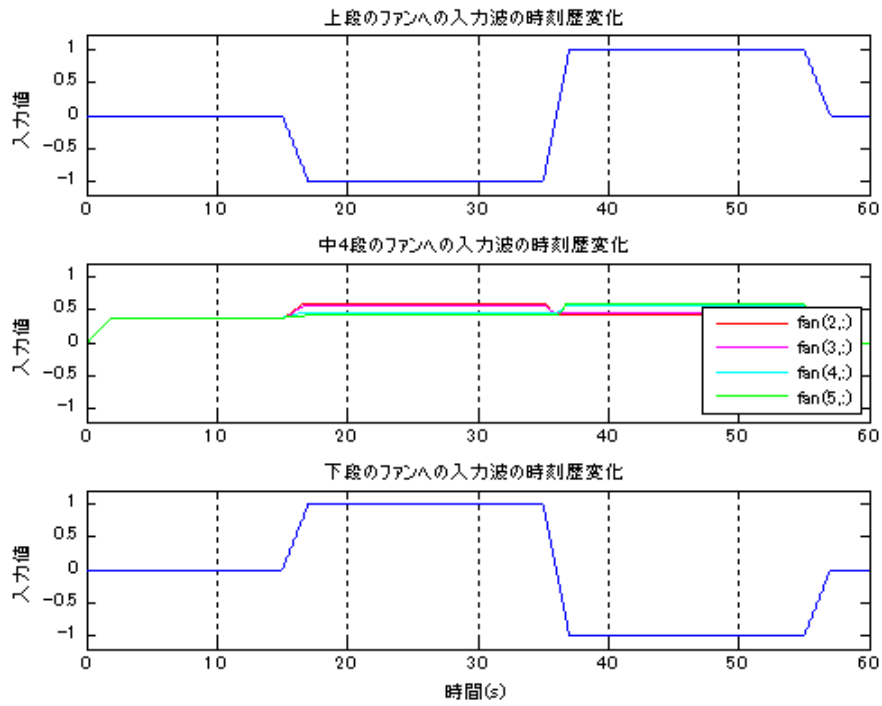


図 NUD7 で 2 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

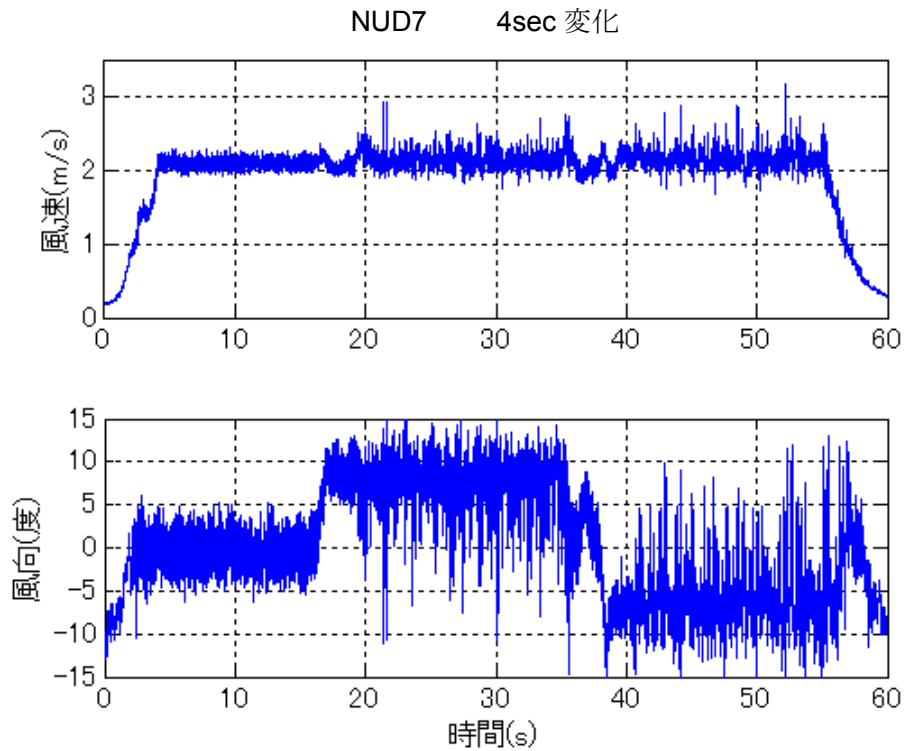


図 NUD7 で 4 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

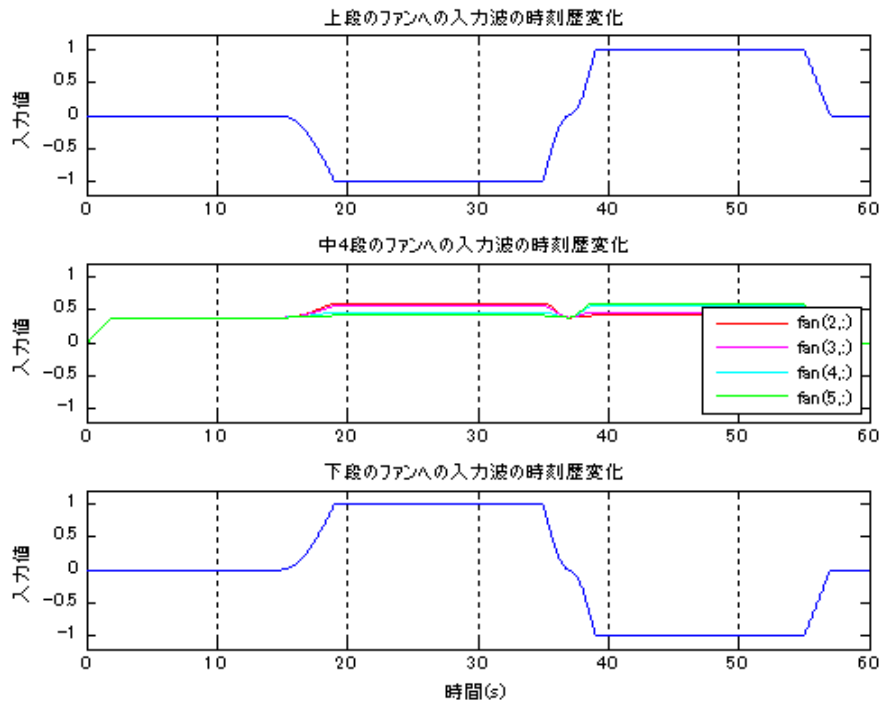


図 NUD7 で 4 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

NUD7 6sec 変化

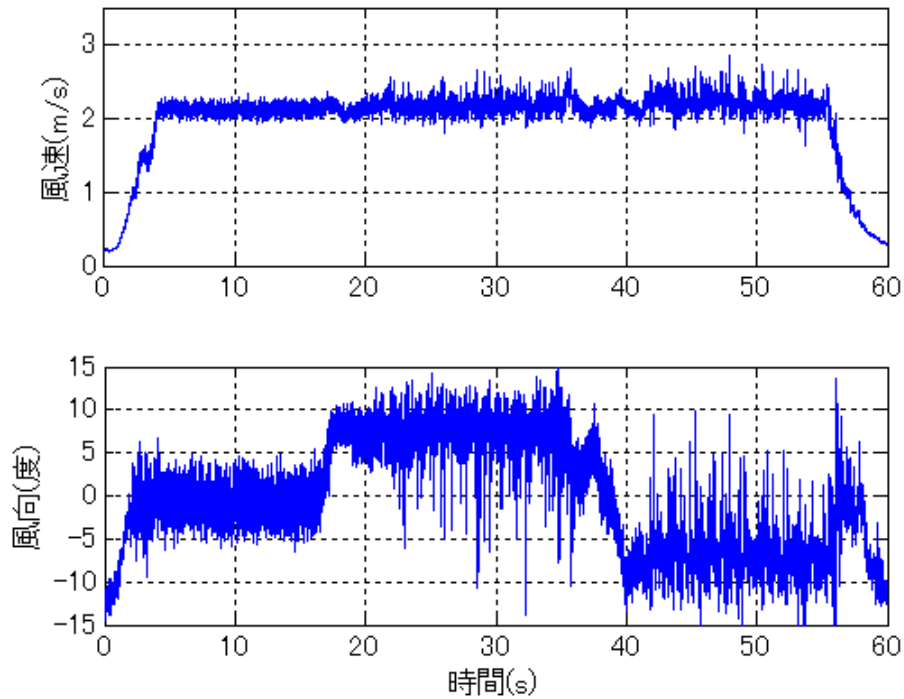


図 NUD7 で 6 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

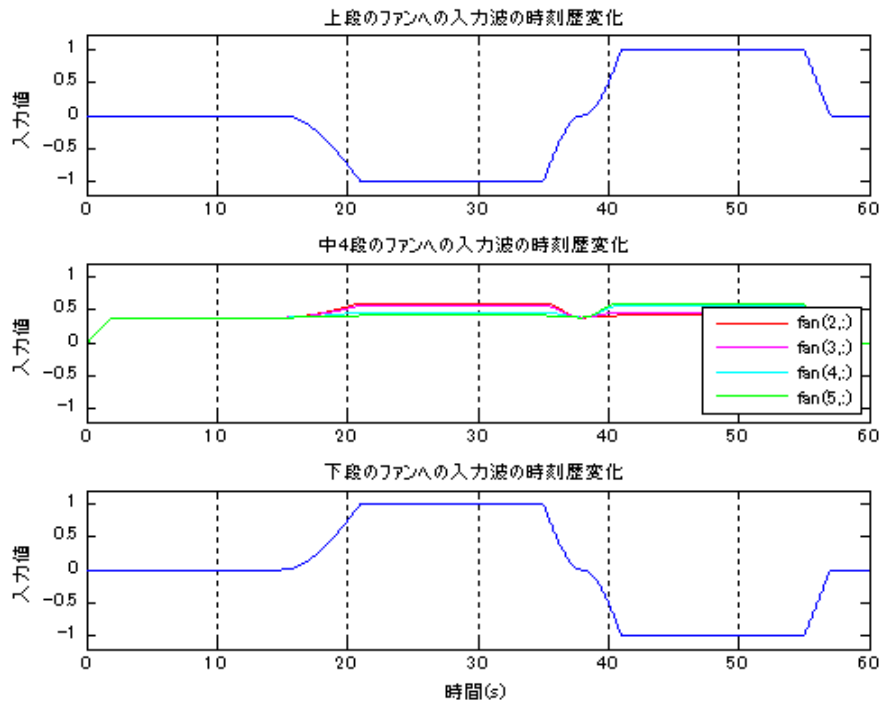


図 NUD7 で 6 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

NUD7 8sec 変化

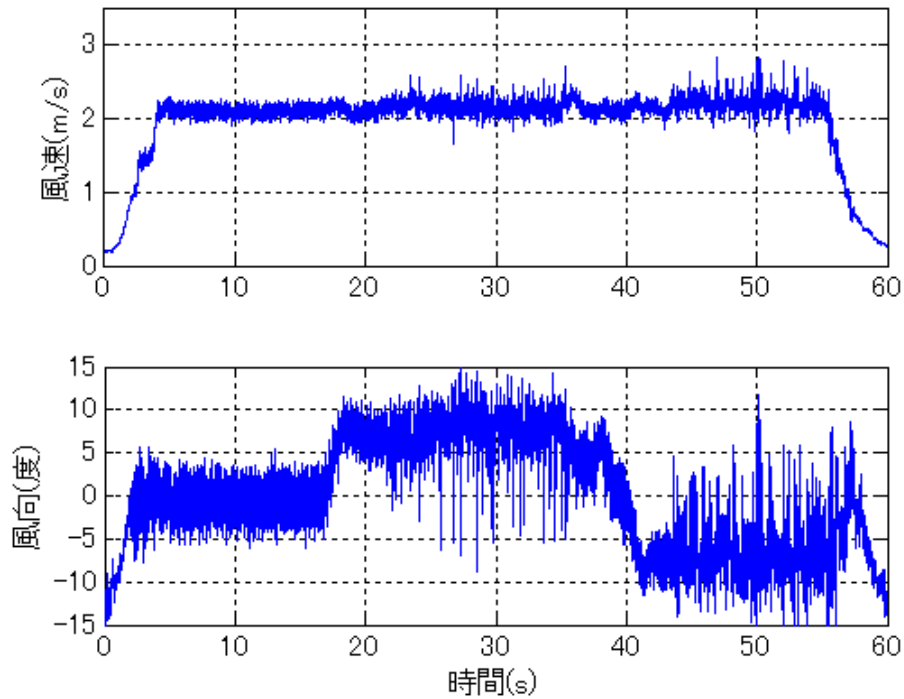


図 NUD7 で 8 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

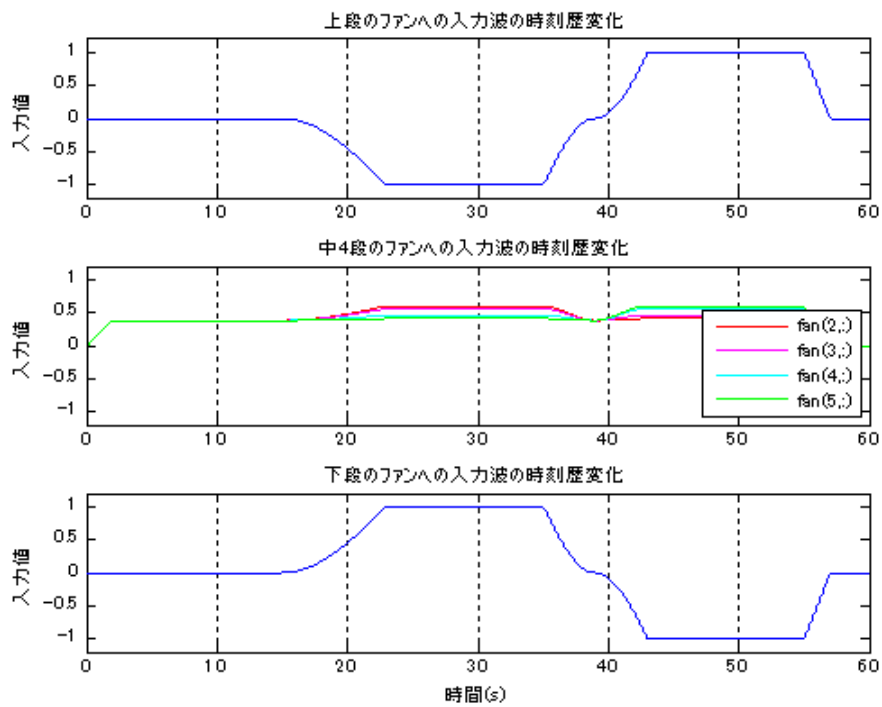


図 NUD7 で 8 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

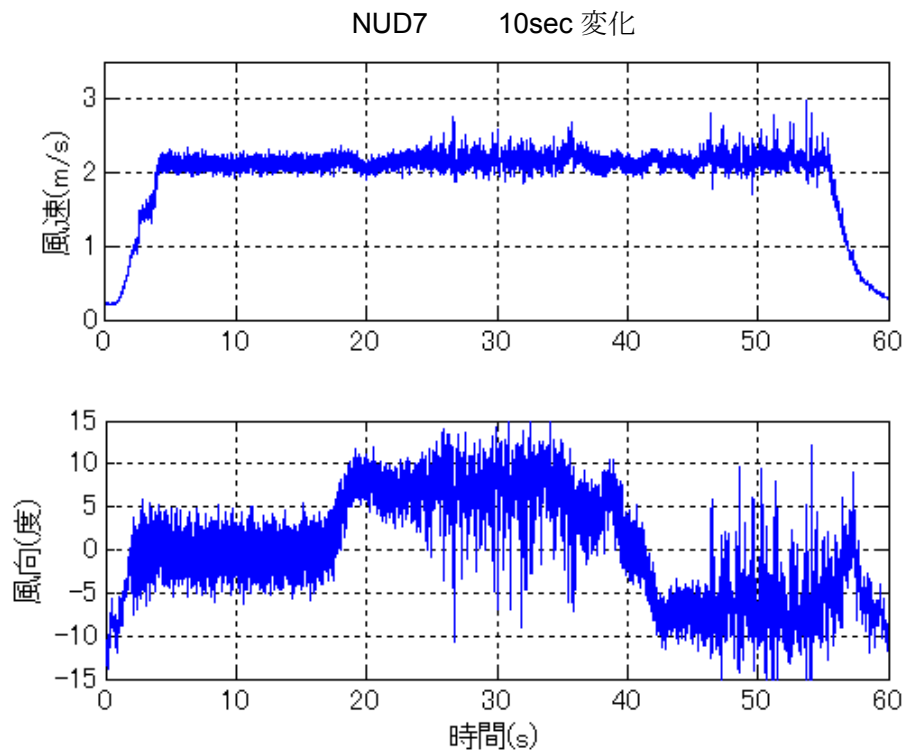


図 NUD7 で 10 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

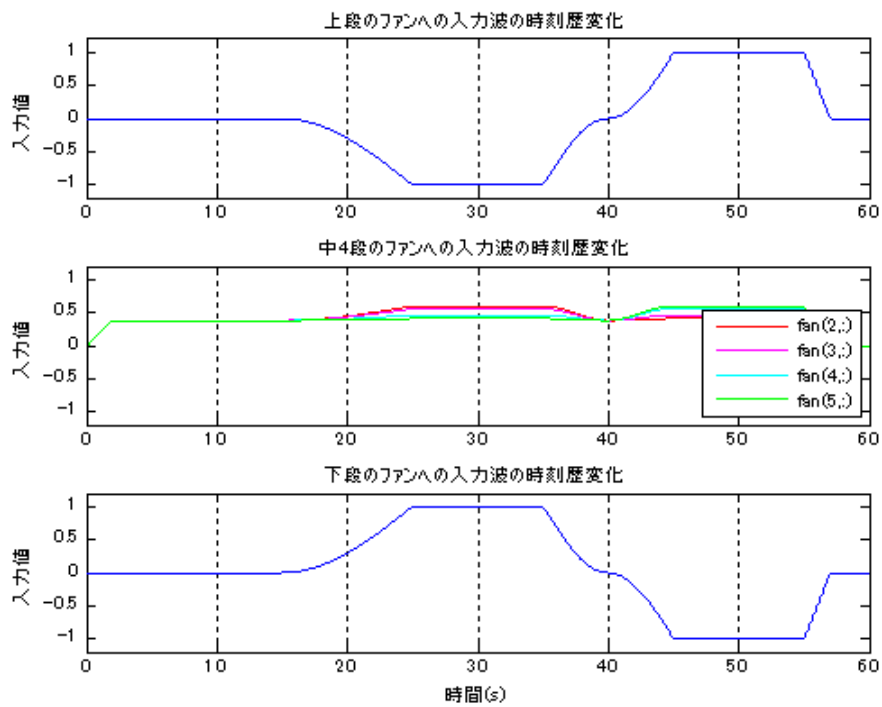


図 NUD7 で 10 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

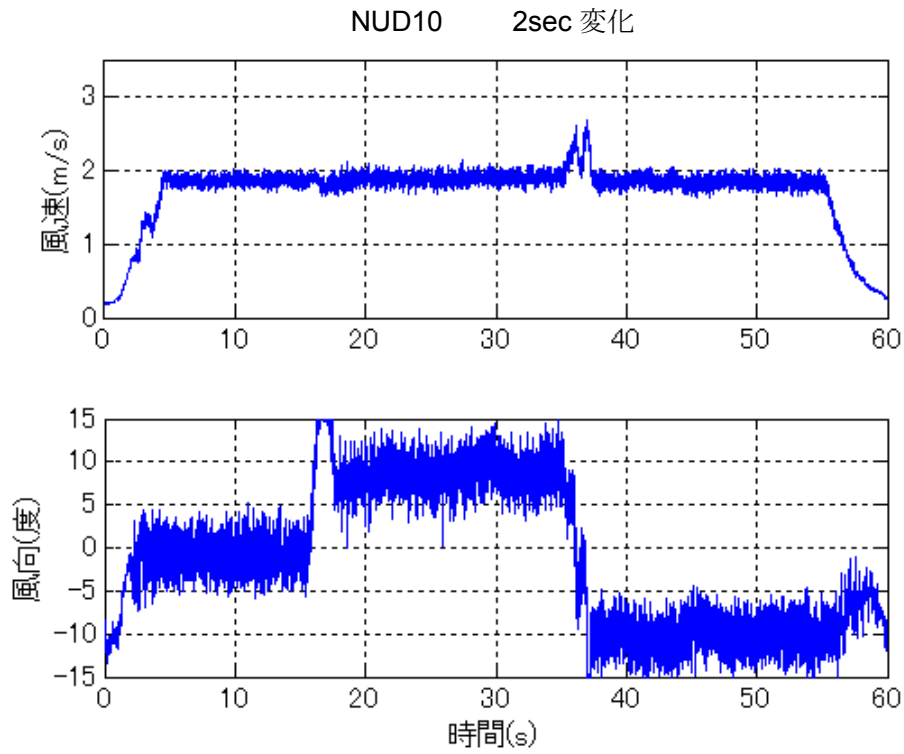


図 NUD10 で 2 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

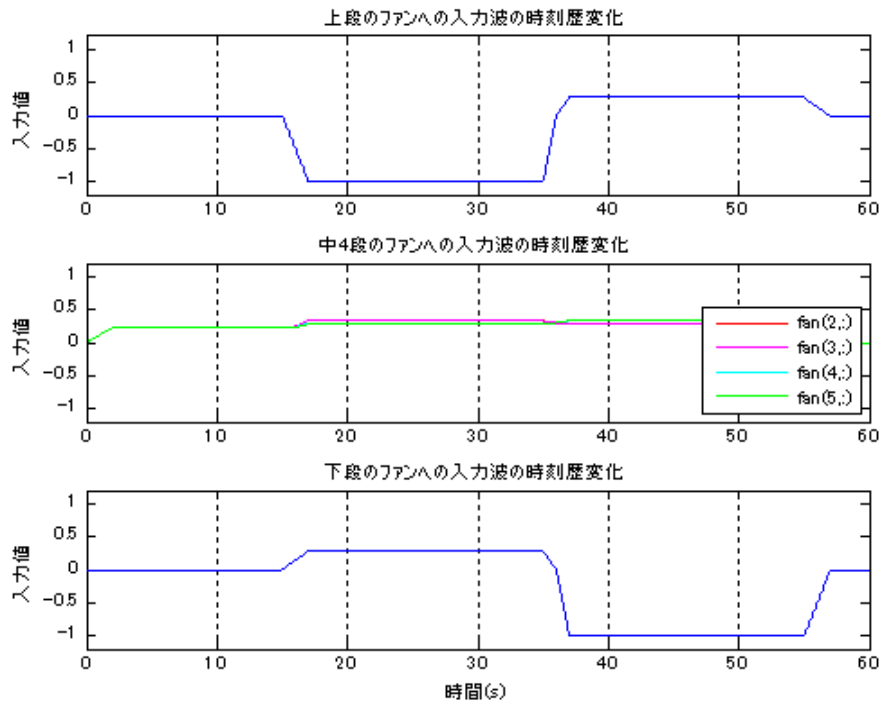


図 NUD10 で 2 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

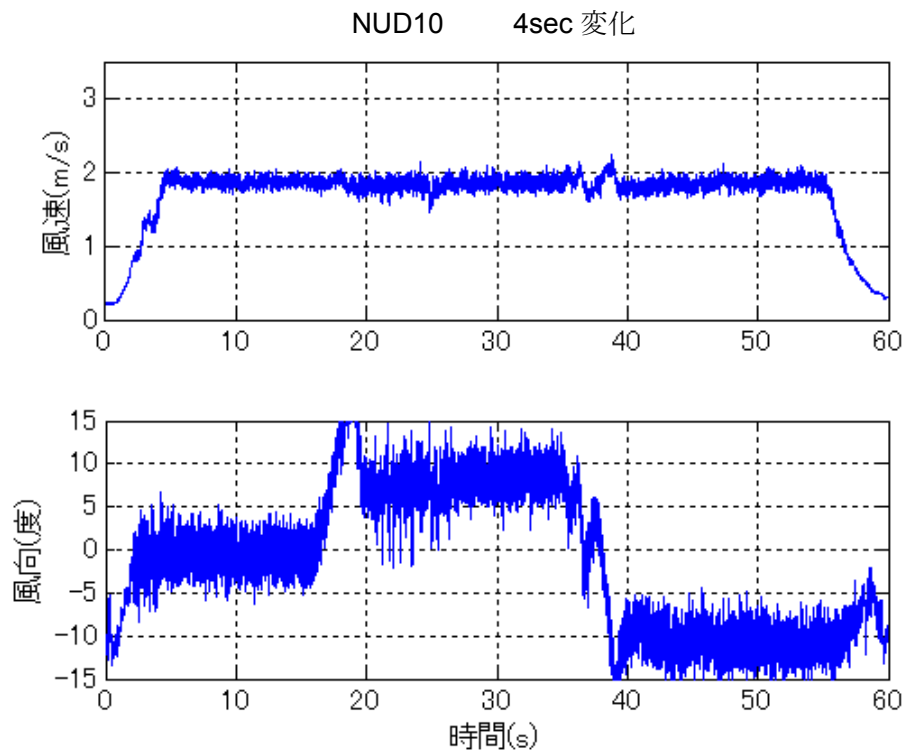


図 NUD10 で 4 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

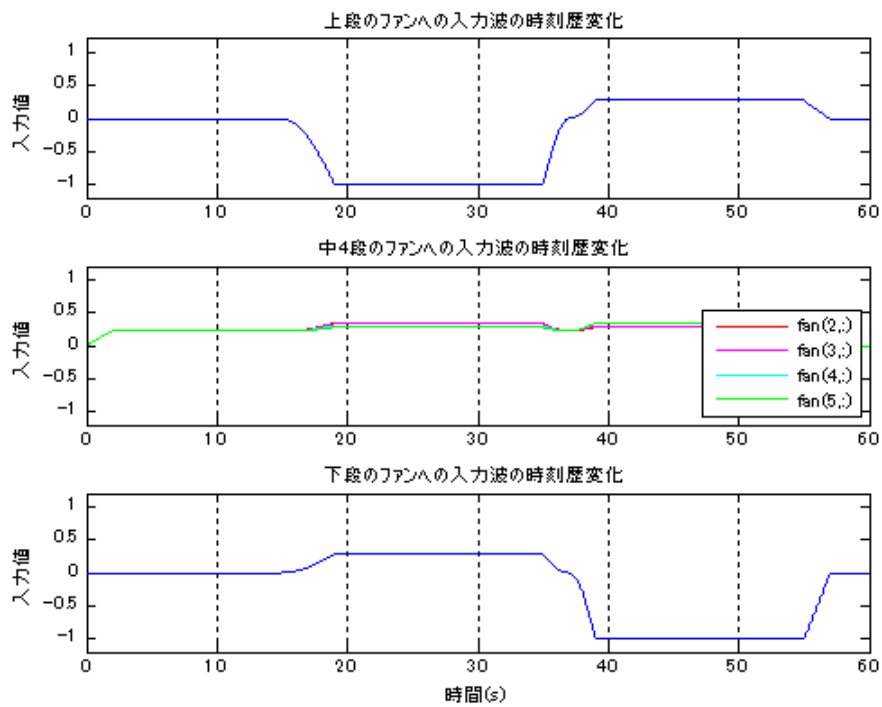


図 NUD10 で 4 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

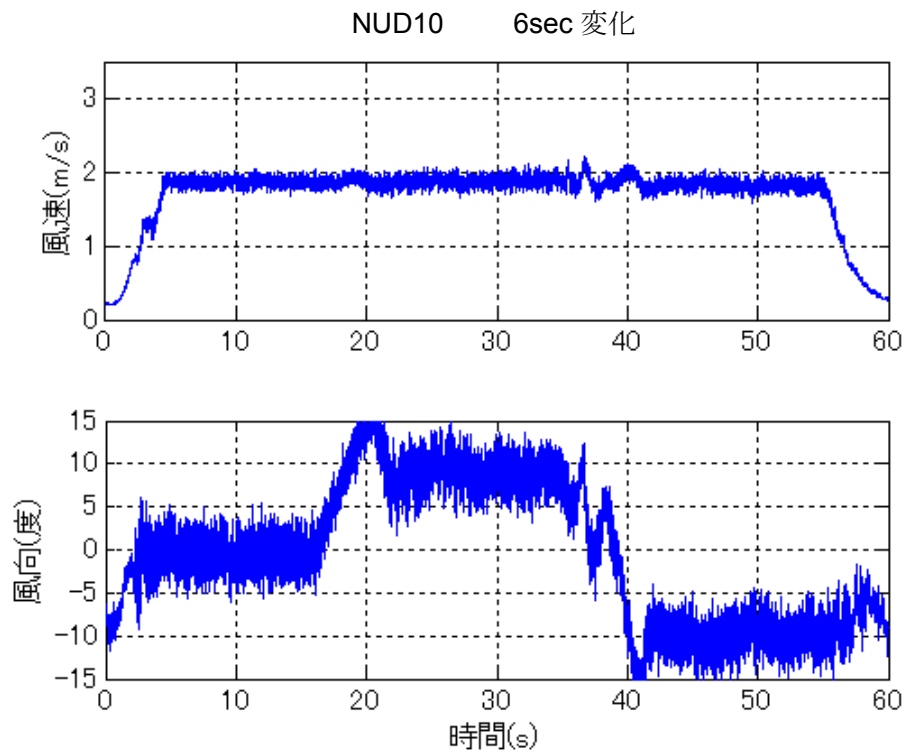


図 NUD10 で 6 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

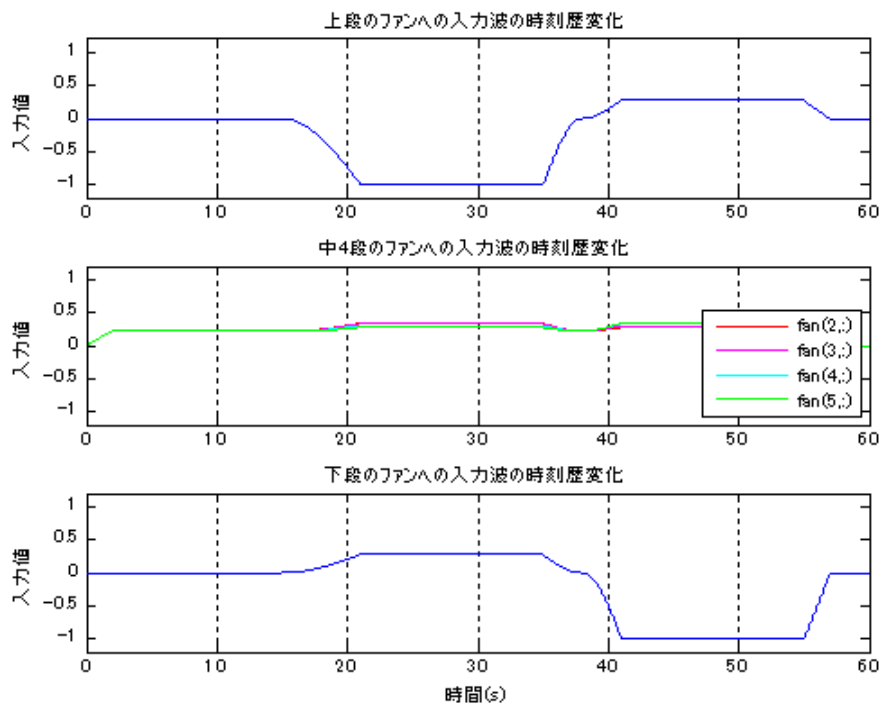


図 NUD10 で 6 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

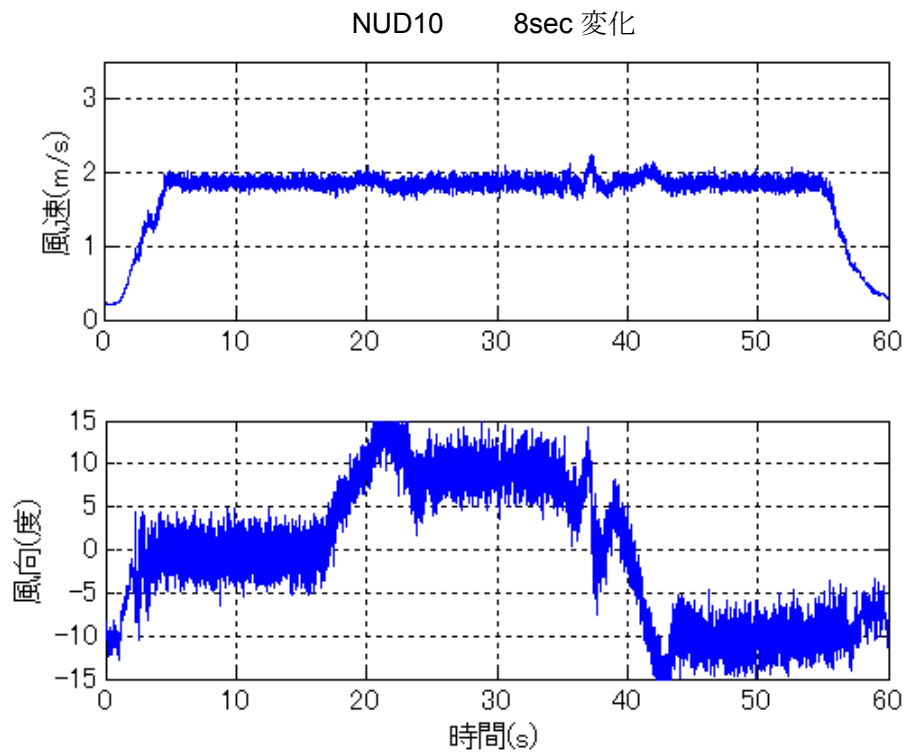


図 NUD10 で 8 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

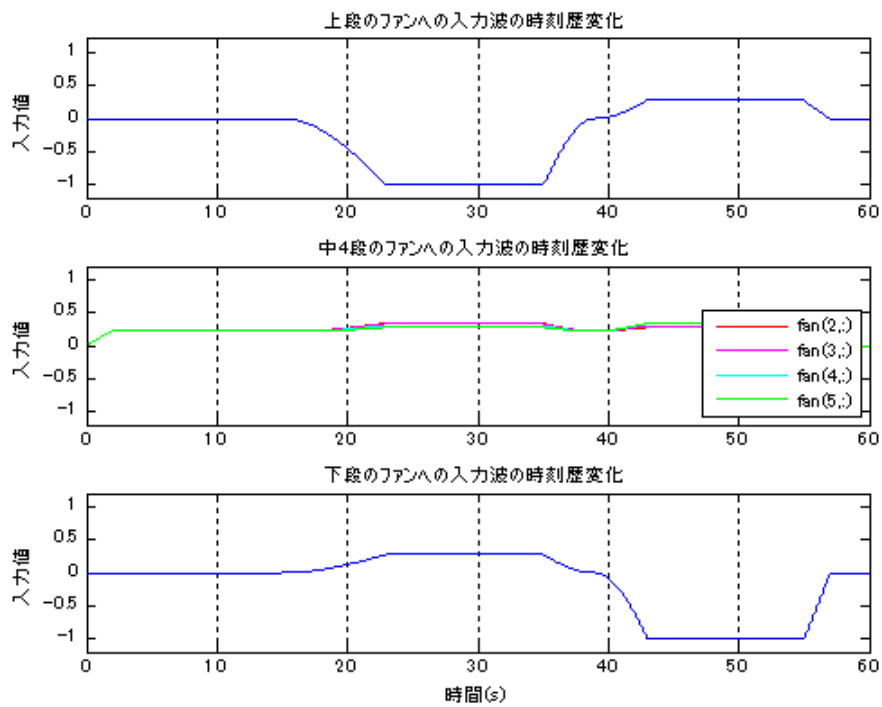


図 NUD10 で 8 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

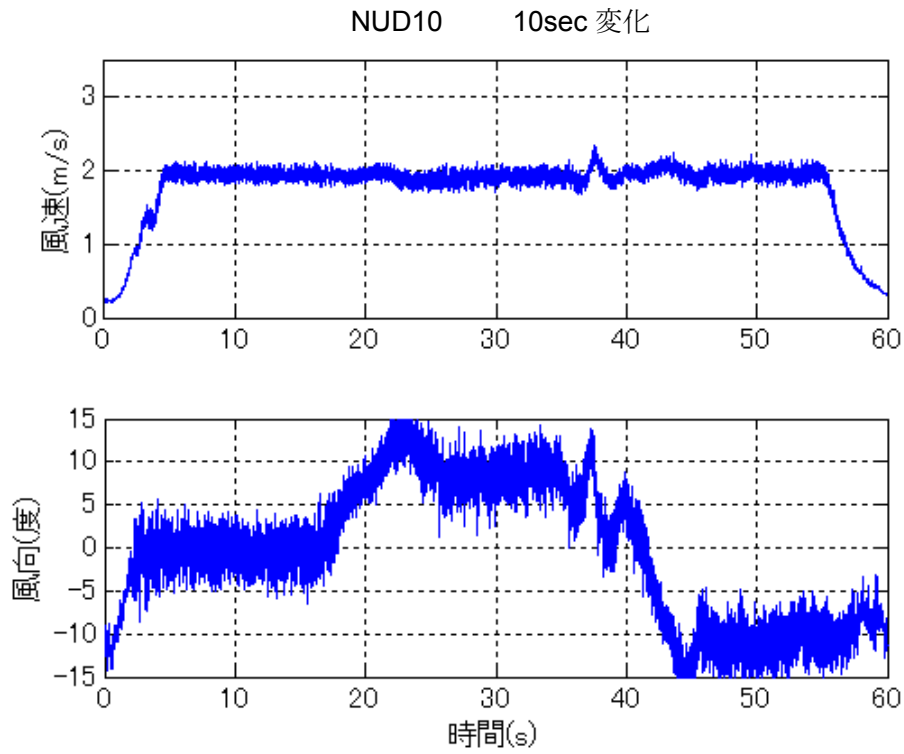


図 NUD10 で 10 秒変化時の基準点での風速・風向時刻歴

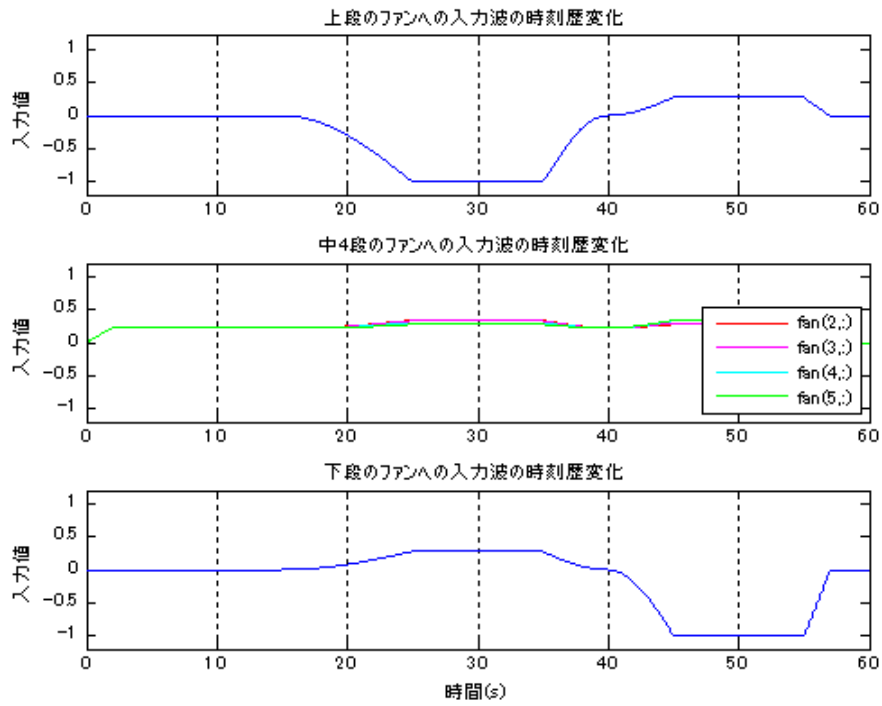


図 NUD10 で 10 秒変化時の各ファンへの入力時刻歴

風向変化時の角柱模型の風圧係数の時刻歴データ

5章における実験にて計測した実験結果をここに載せる。表 3.8 にまとめてある気流の合計 30 通りのケースについてそれぞれで模型の設置角度 0~45 度の間を 5 度刻みで合計 10 通りの計測を行うので、合計 300 パターンの測定を行っているが、ここでは NDU5, NUD5, NDU10, NUD10 の 4 つのケースについて変化時間は 2 秒と 10 秒で各設置角度の合計 80 パターンについて測定結果を載せる。図の並び順は図 5.38 に従う。

表 3.8 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

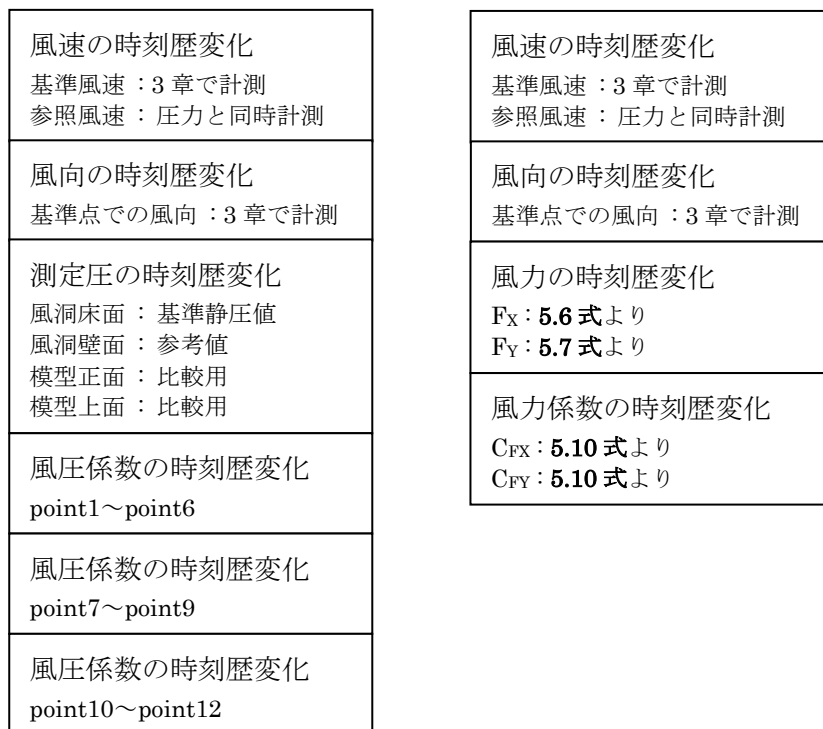


図 5.38 図の並び方

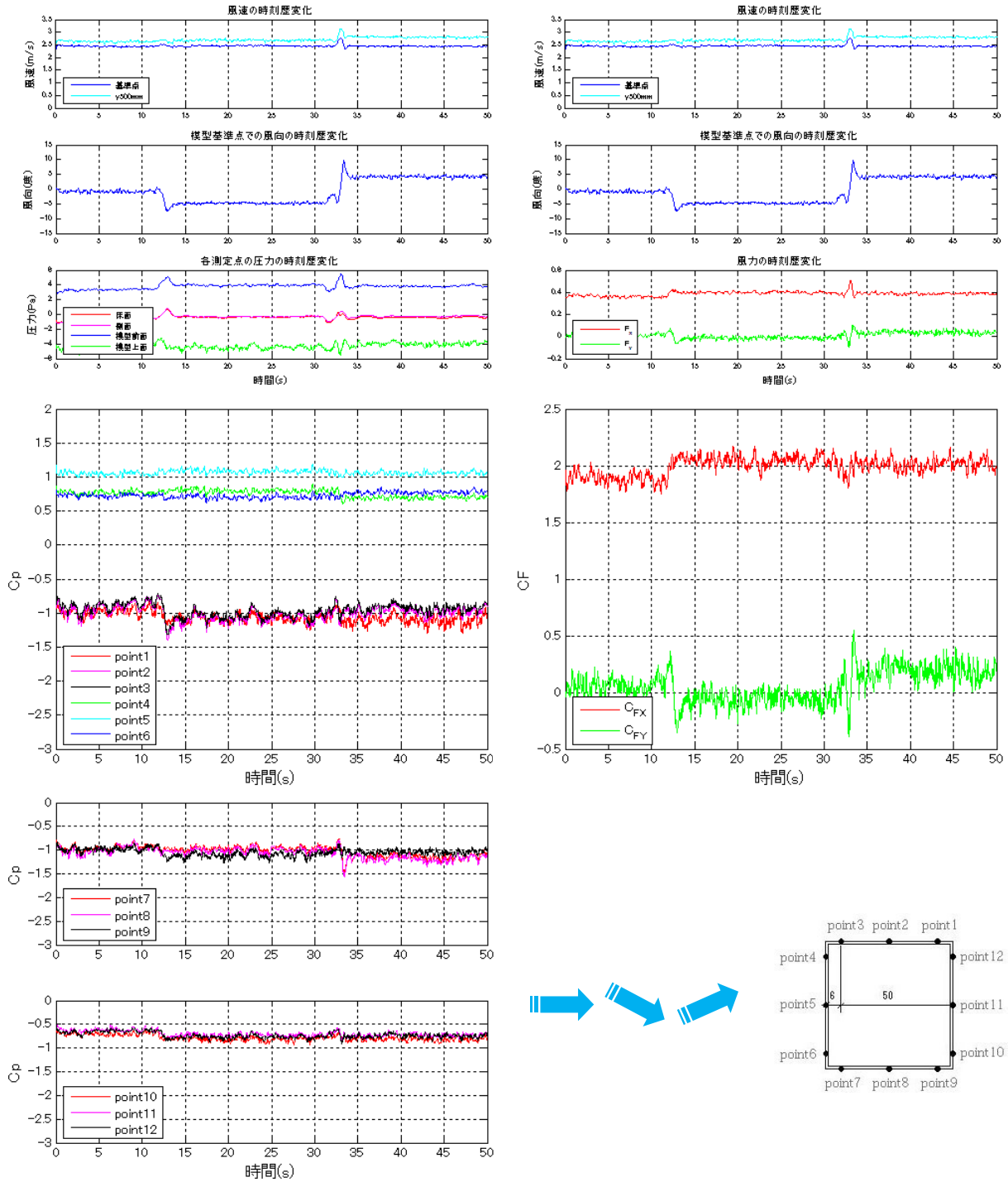


図 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 0° での時刻歴変化

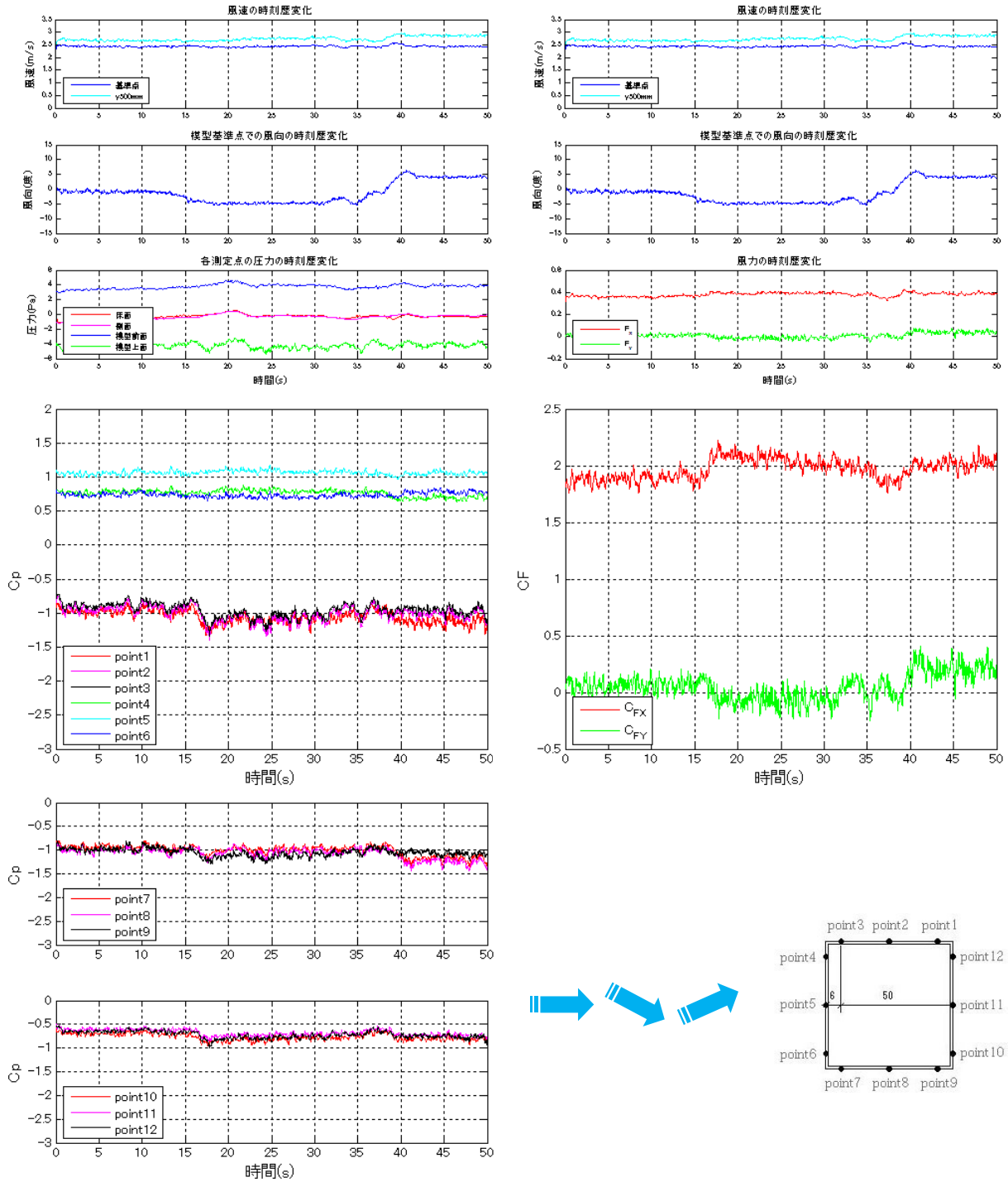


図 NDU5 の 10 秒変化時の模型角度 0° での時刻歴変化

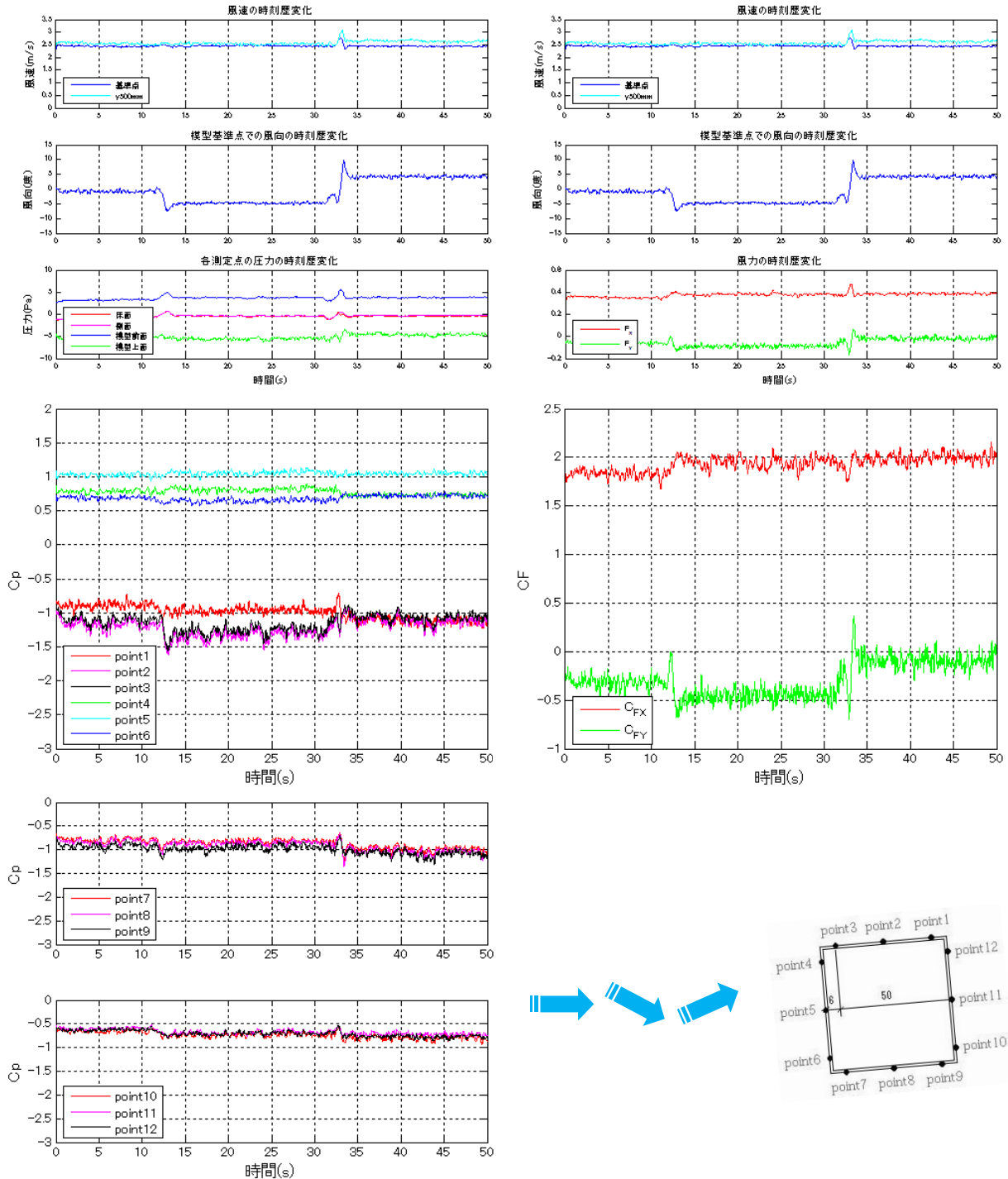


図 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 5° での時刻歴変化

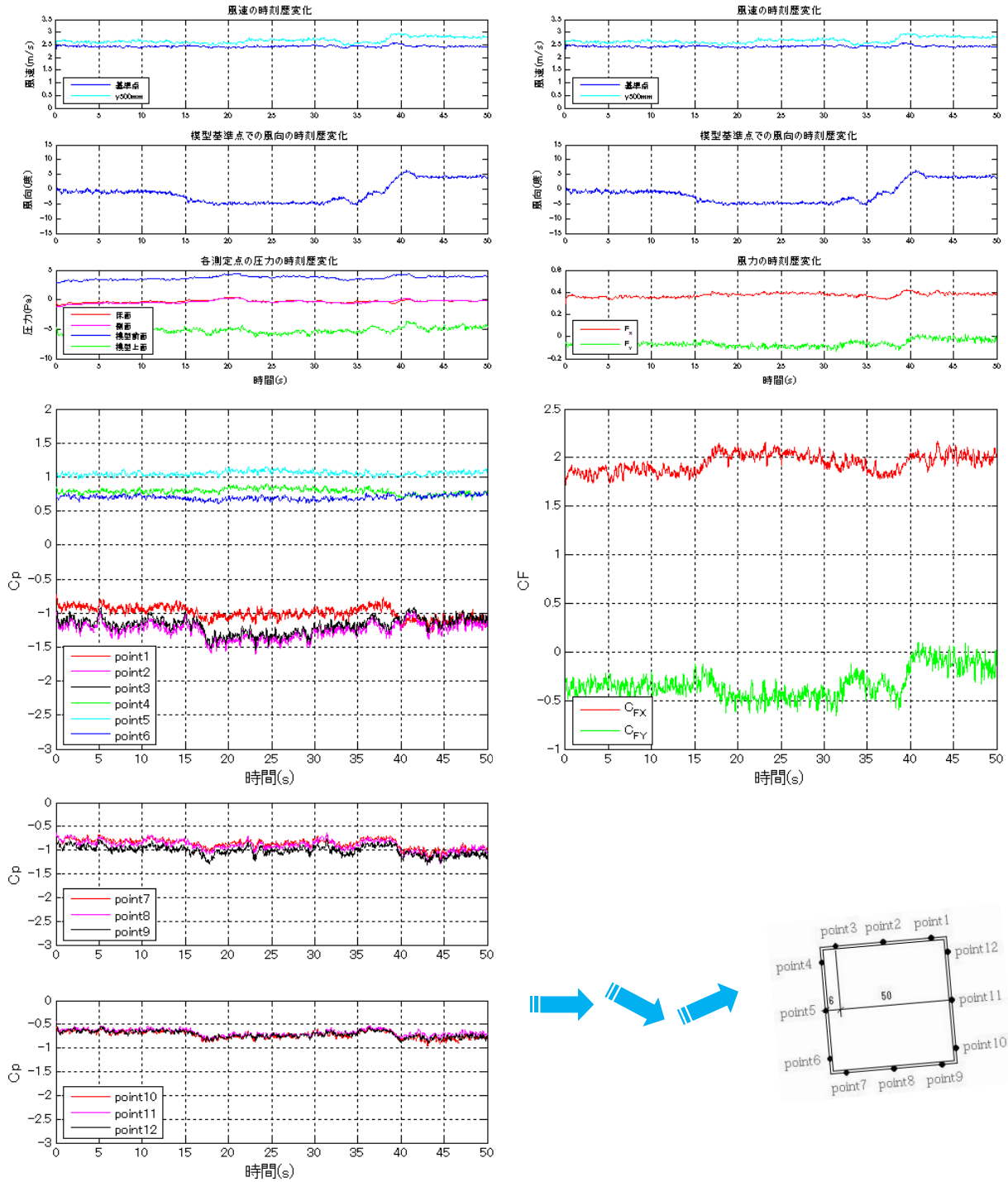


図 NDU5 の 10 秒変化時の模型角度 5° での時刻歴変化

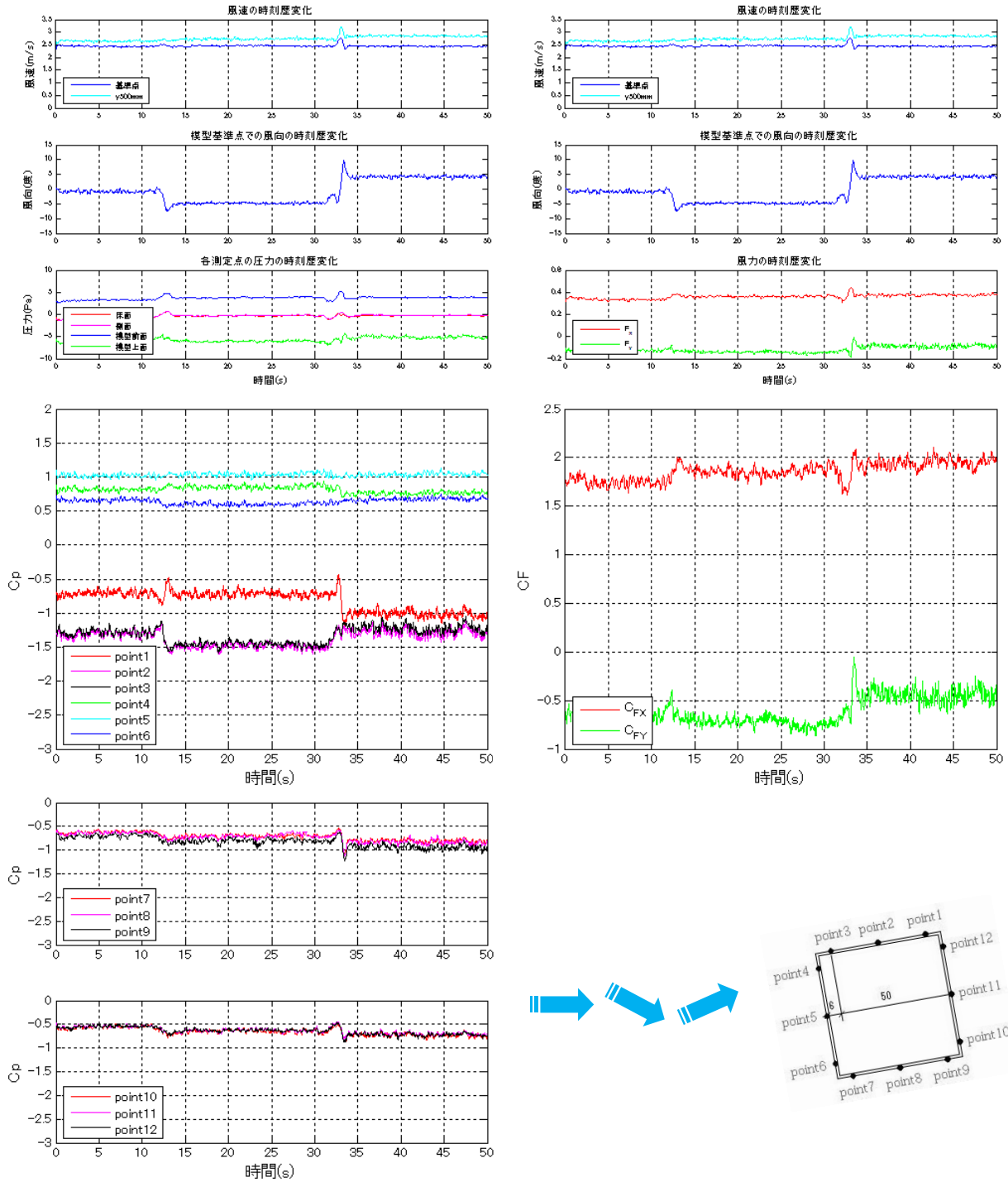


図 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 10° での時刻歴変化

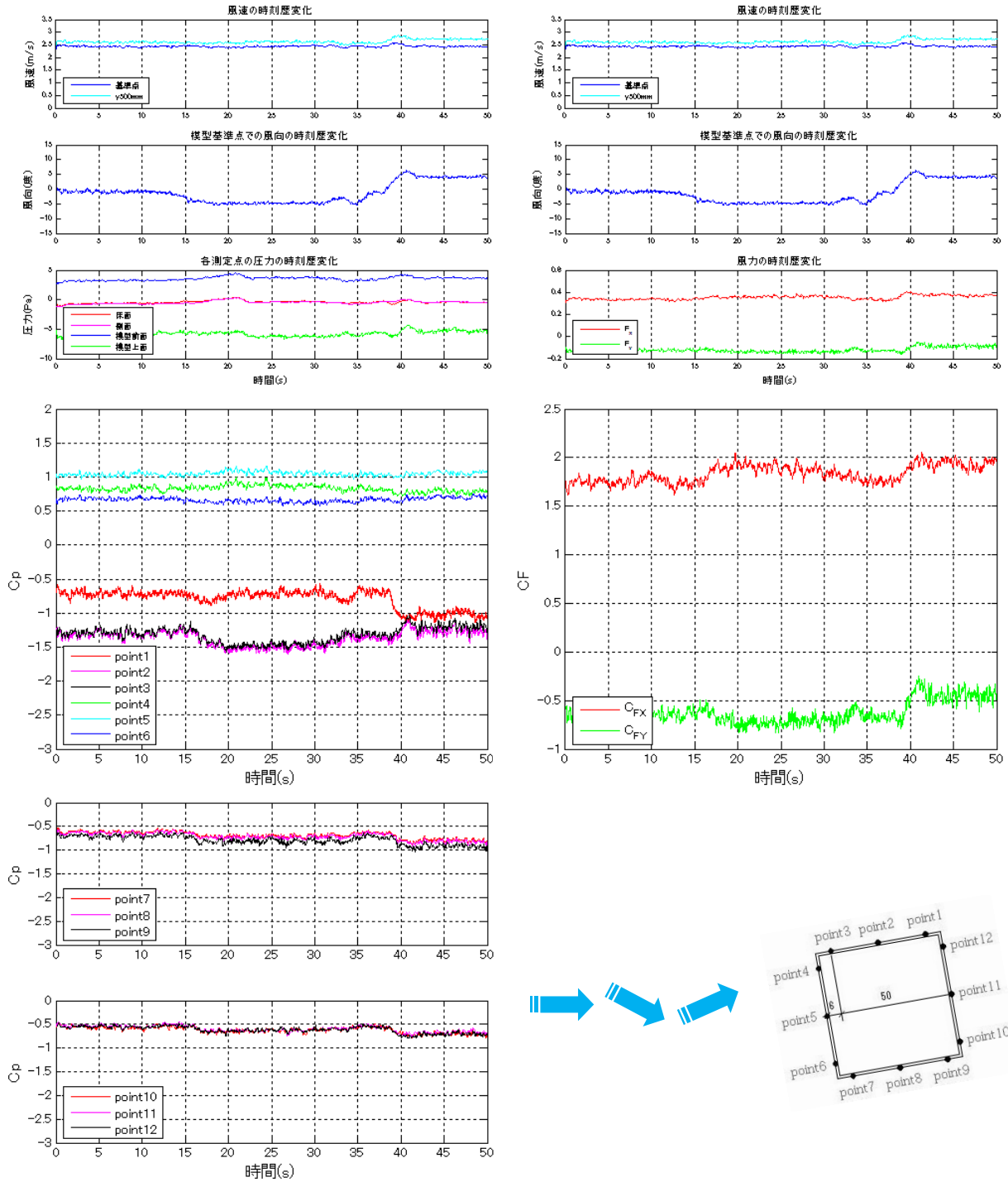


図 NDU5 の 10 秒変化時の模型角度 10° での時刻歴変化

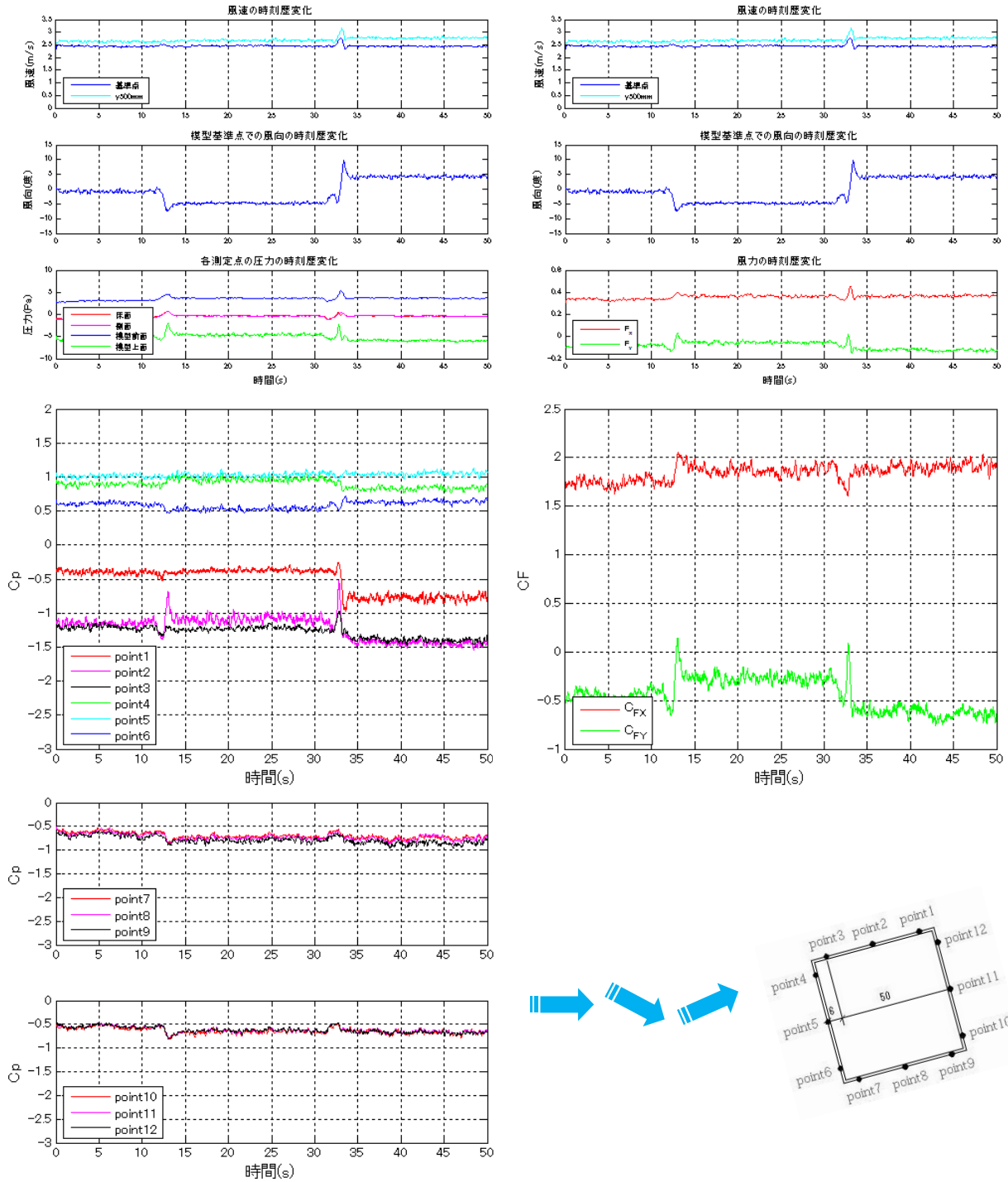


図 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 15° での時刻歴変化

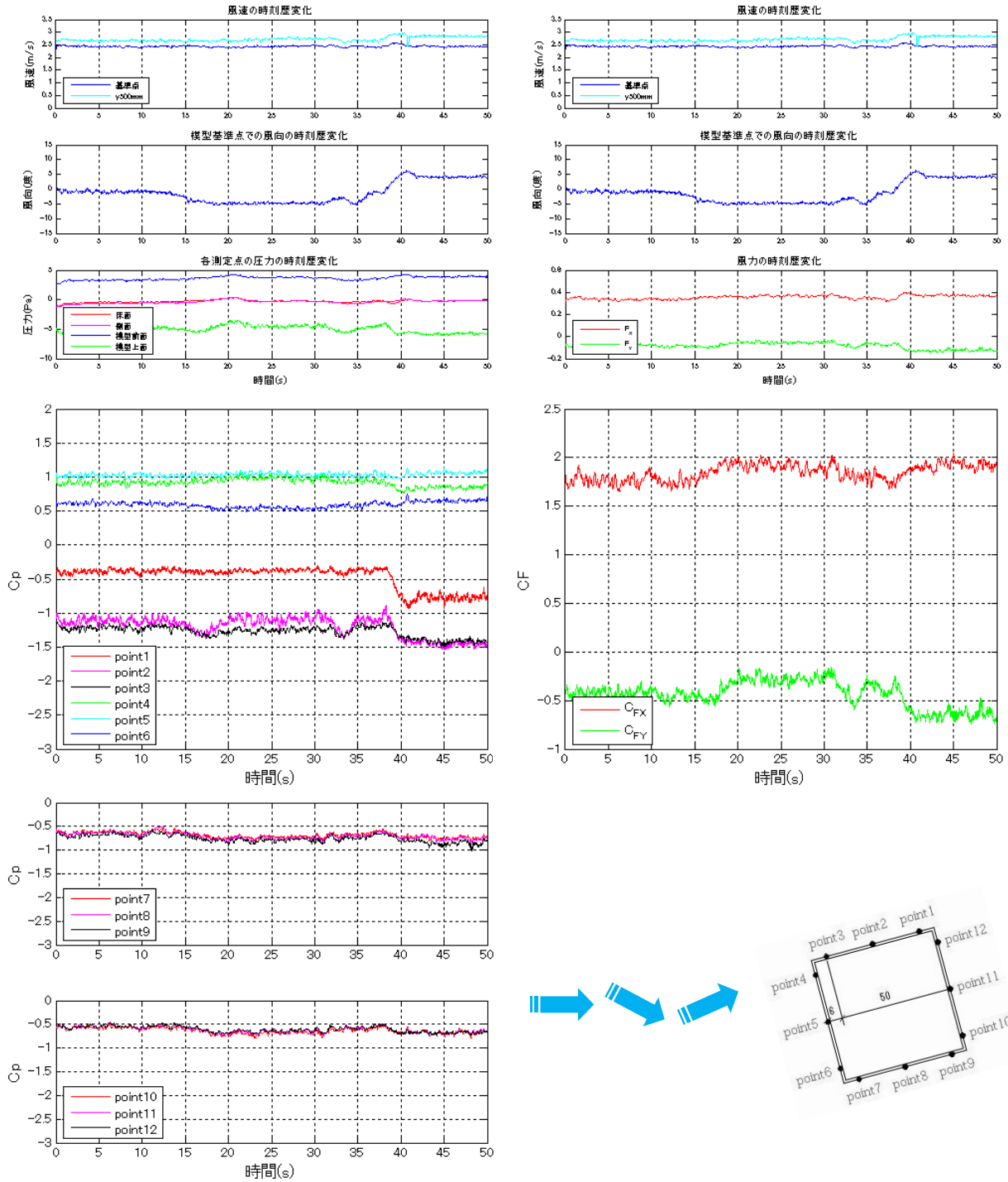


図 NDU5 の 10 秒変化時の模型角度 15° での時刻歴変化

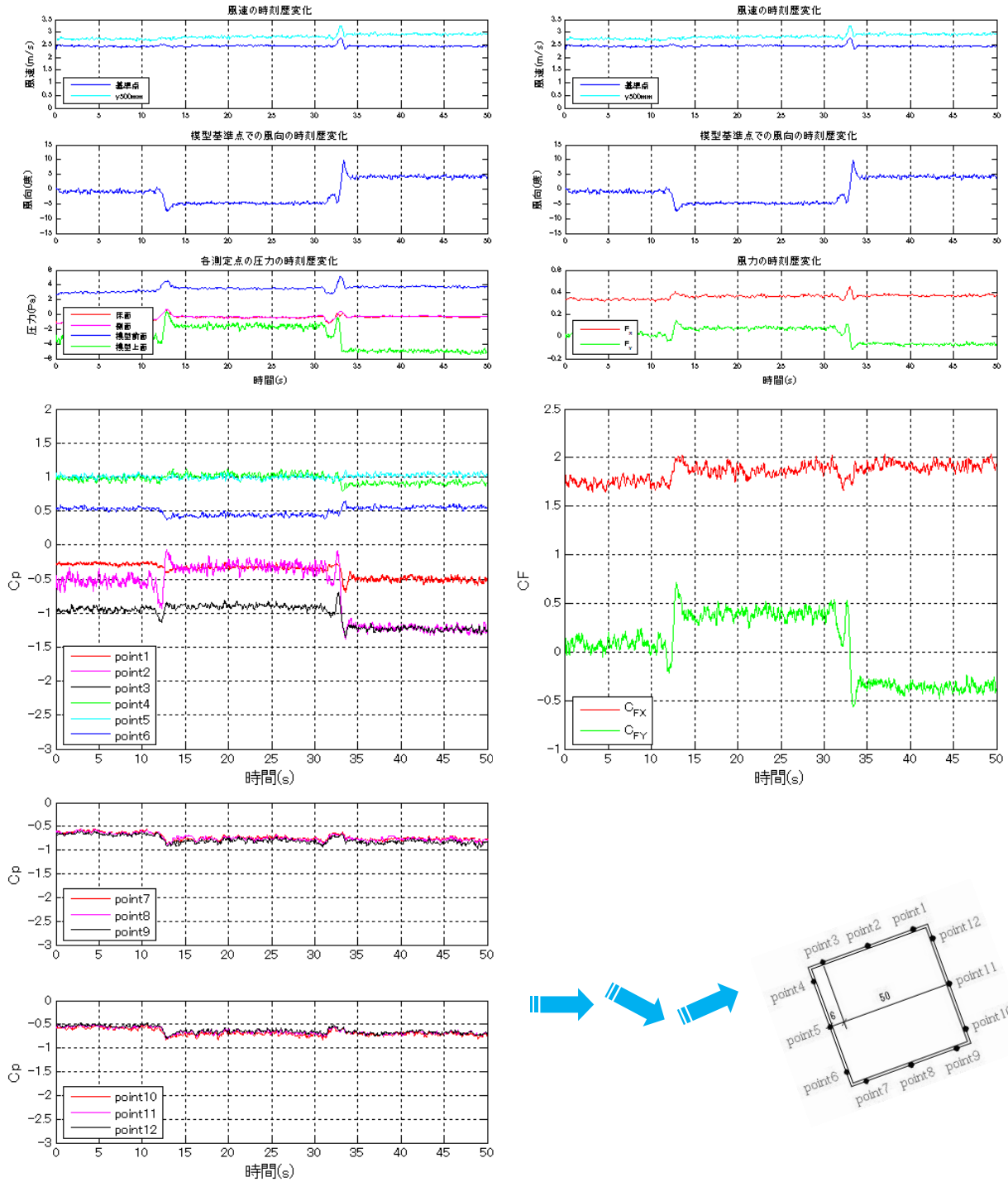


図 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 20° での時刻歴変化

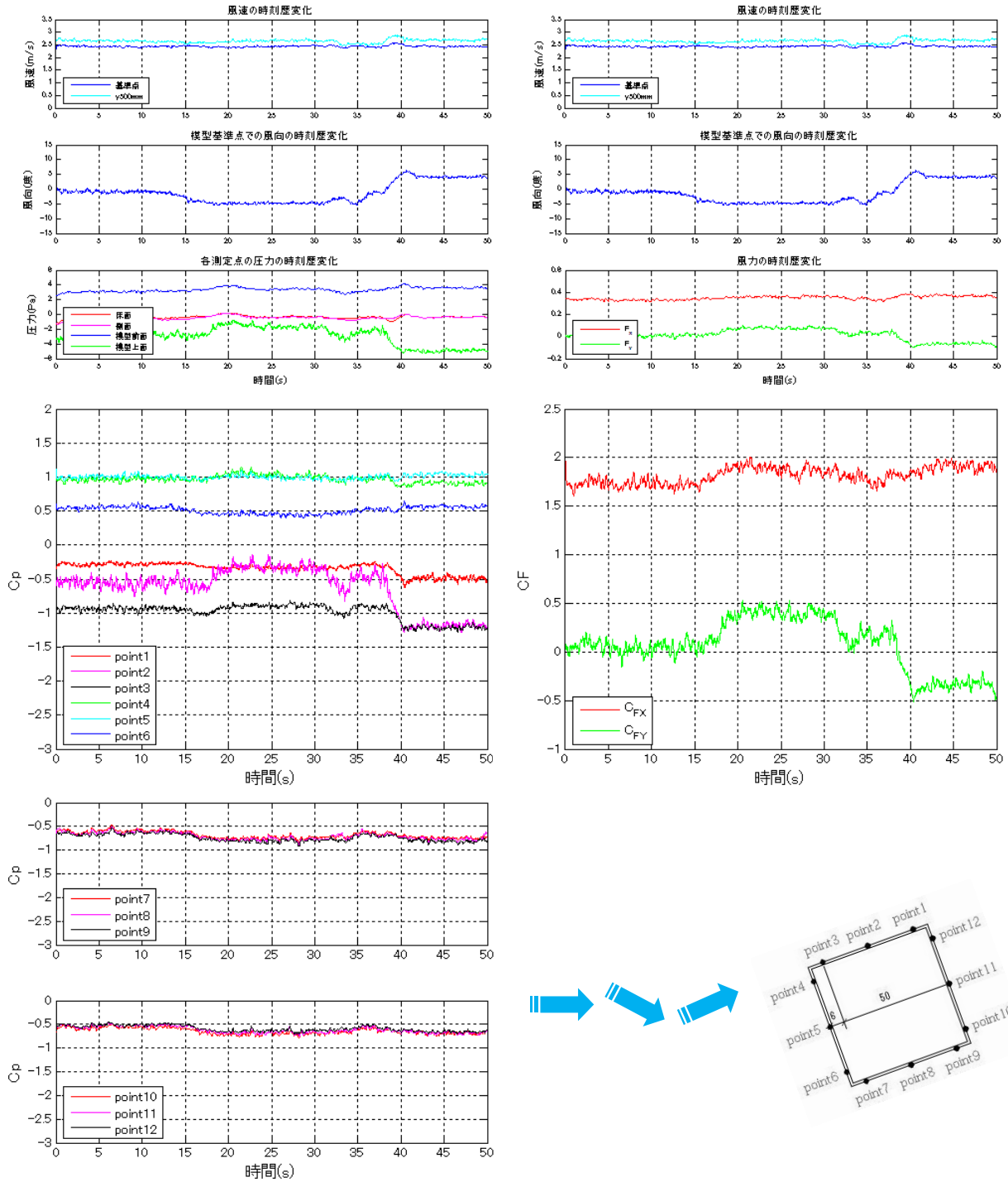


図 NDU5 の 10 秒変化時の模型角度 20° での時刻歴変化

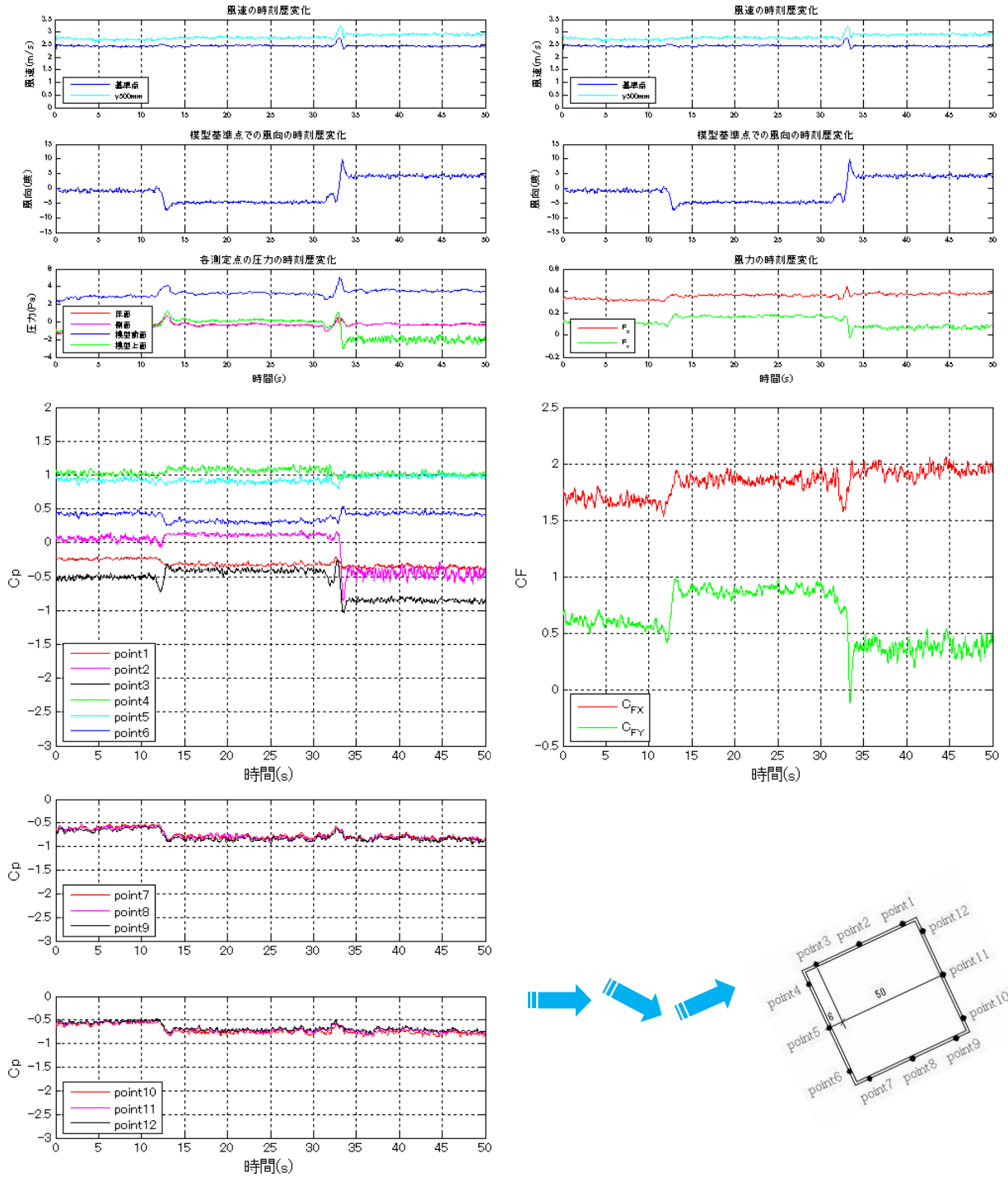


図 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 25° での時刻歴変化

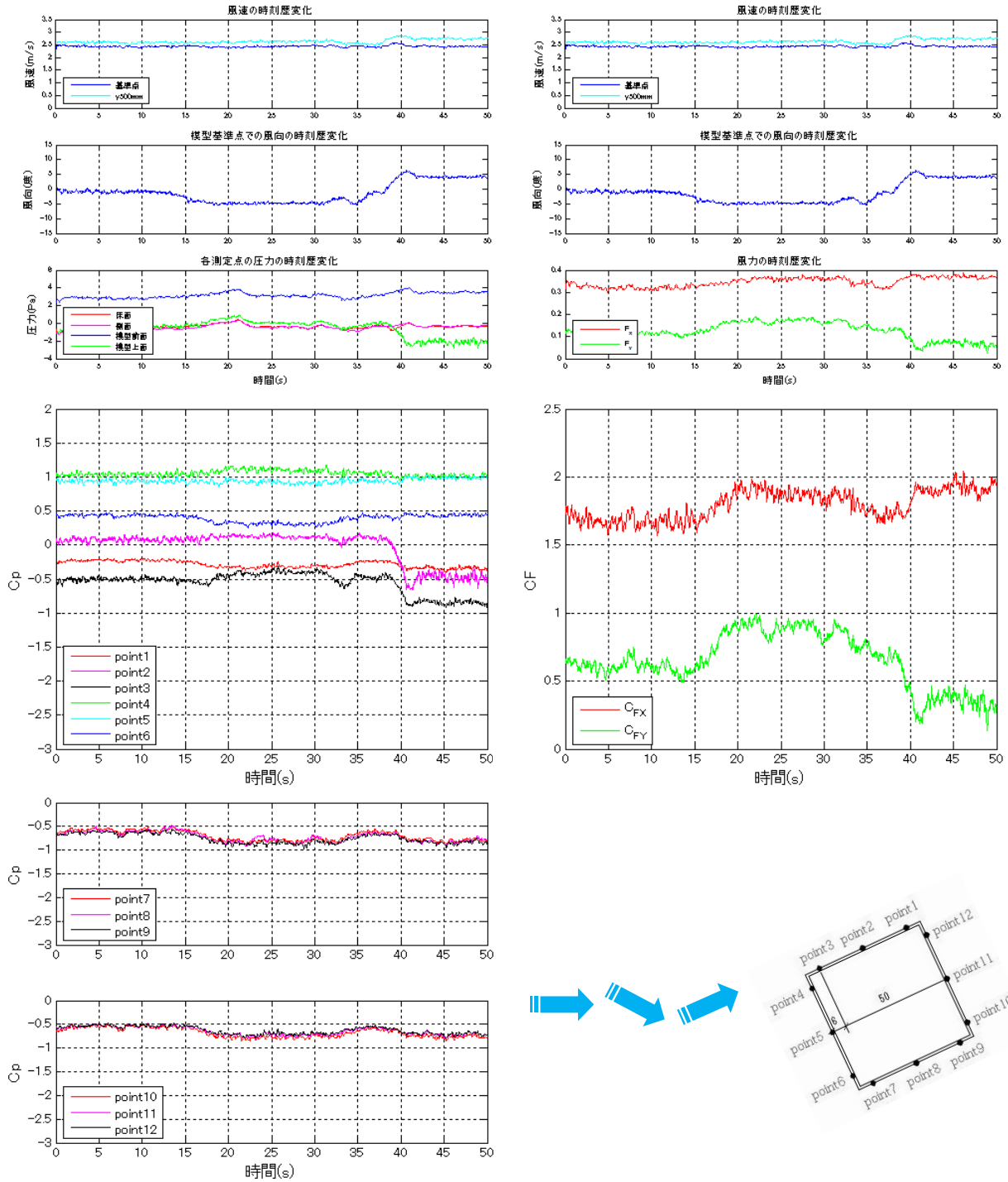


図 NDU5 の 10 秒変化時の模型角度 25° での時刻歴変化

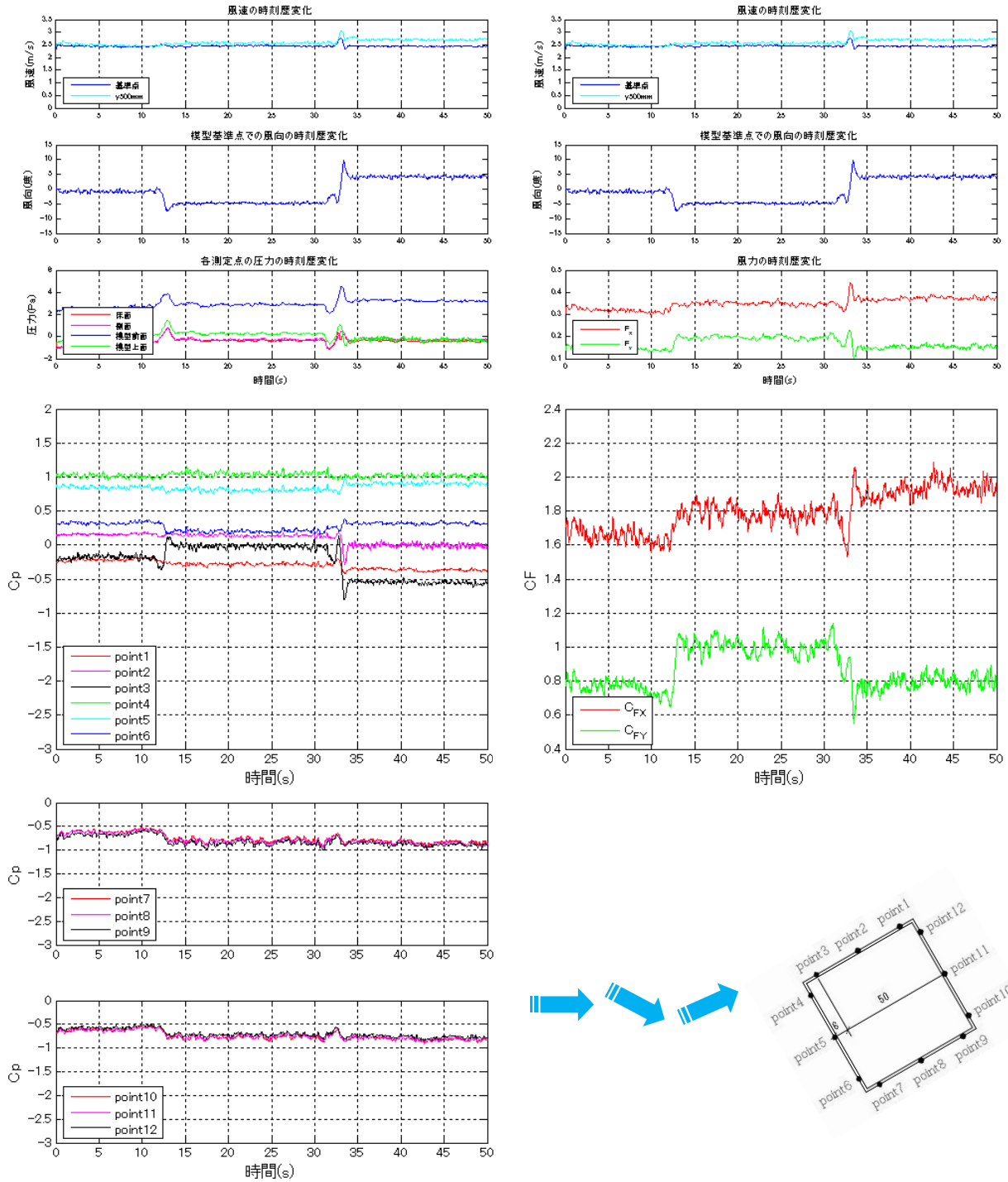


図 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 30° での時刻歴変化

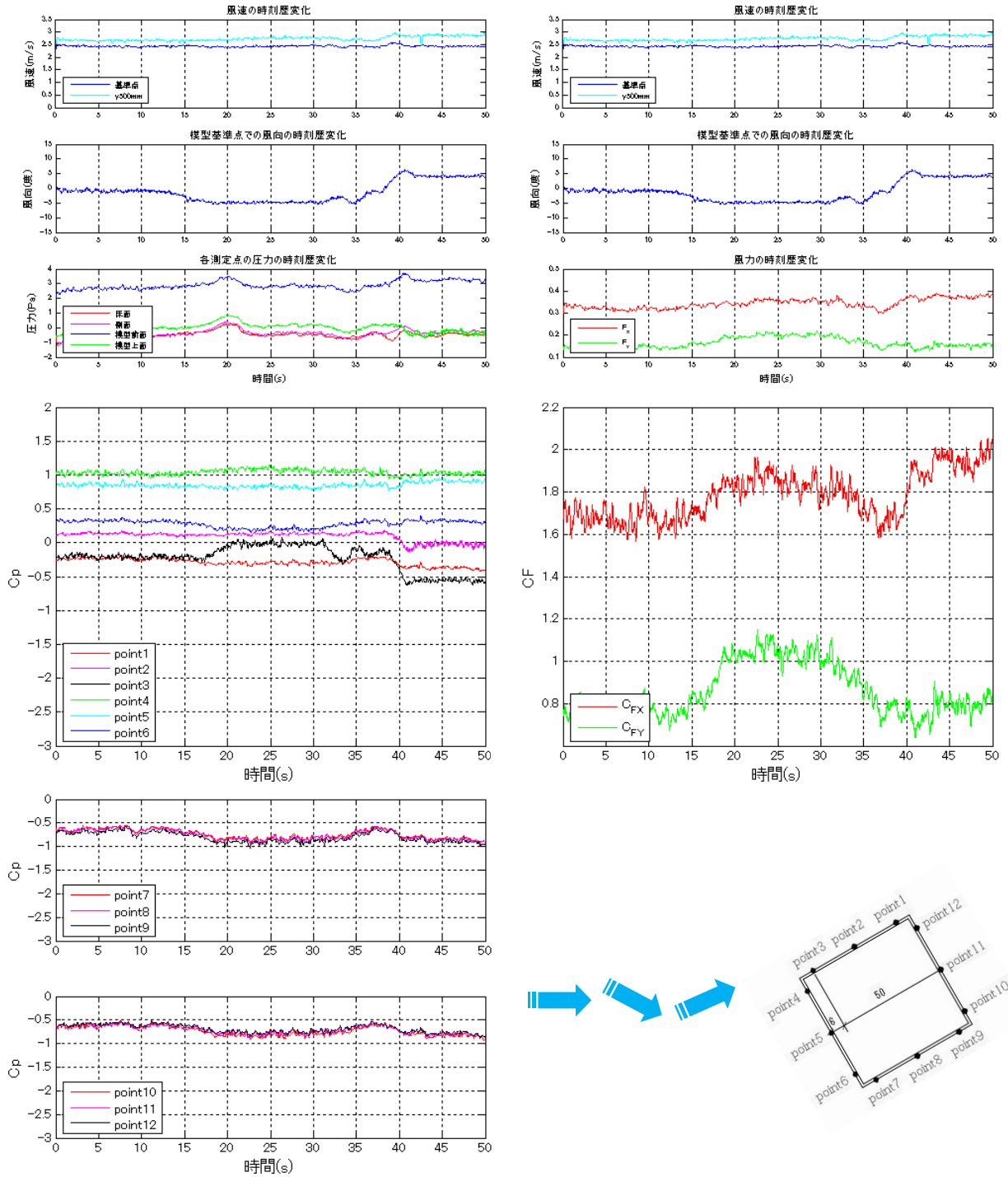


図 NDU5 の 10 秒変化時の模型角度 30° での時刻歴変化

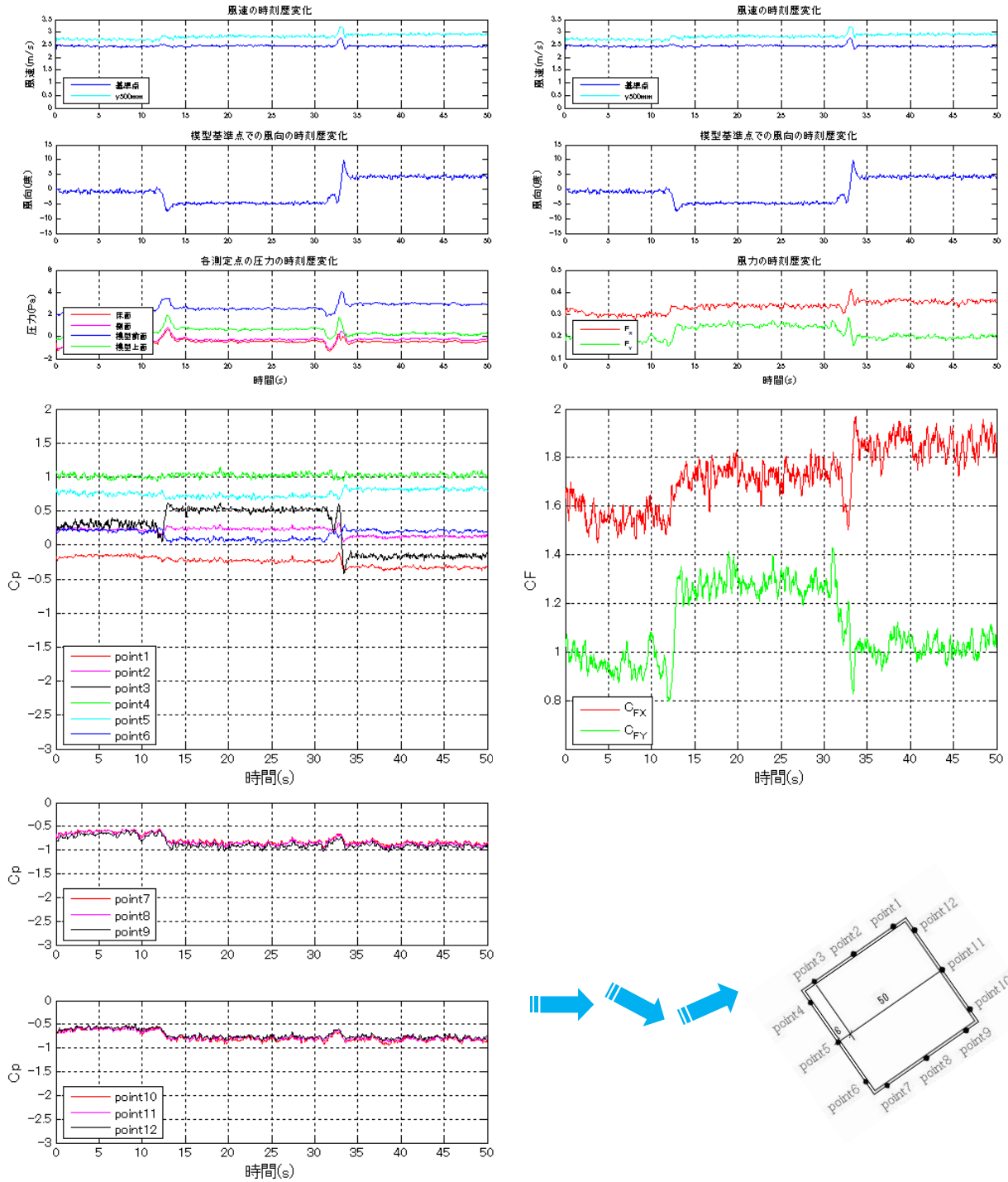


図 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 35° での時刻歴変化

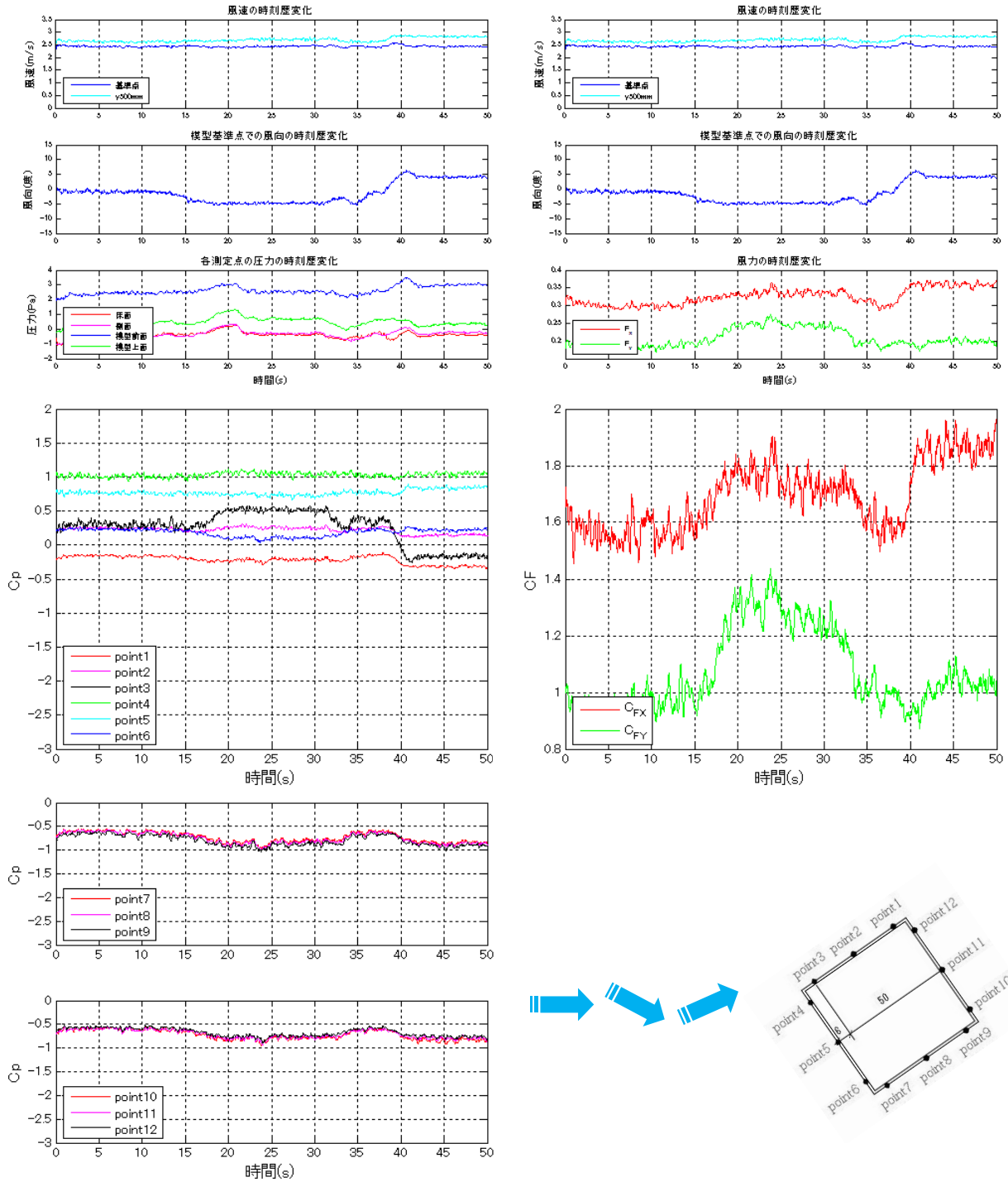


図 NDU5 の 10 秒変化時の模型角度 35° での時刻歴変化

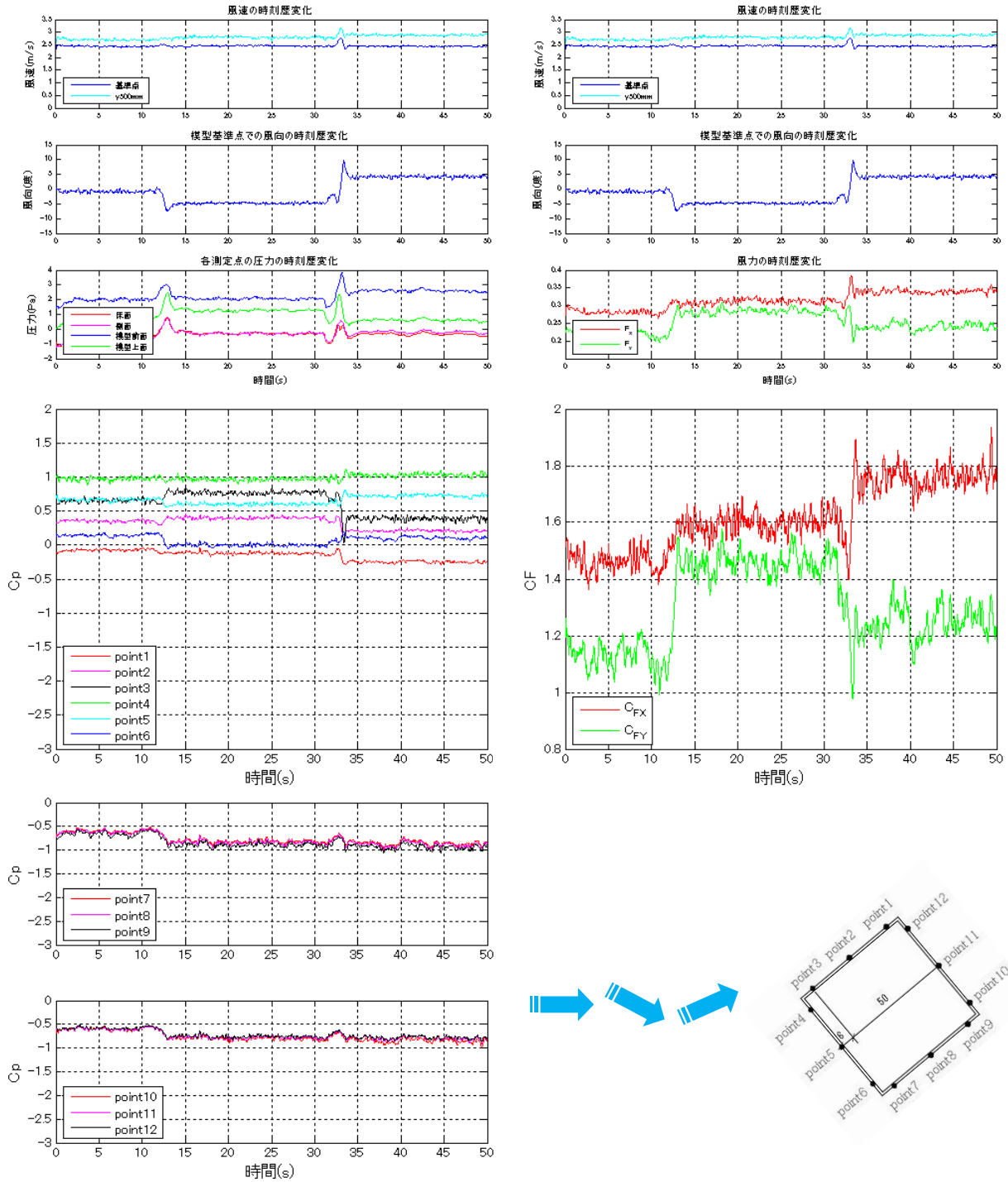


図 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 40° での時刻歴変化

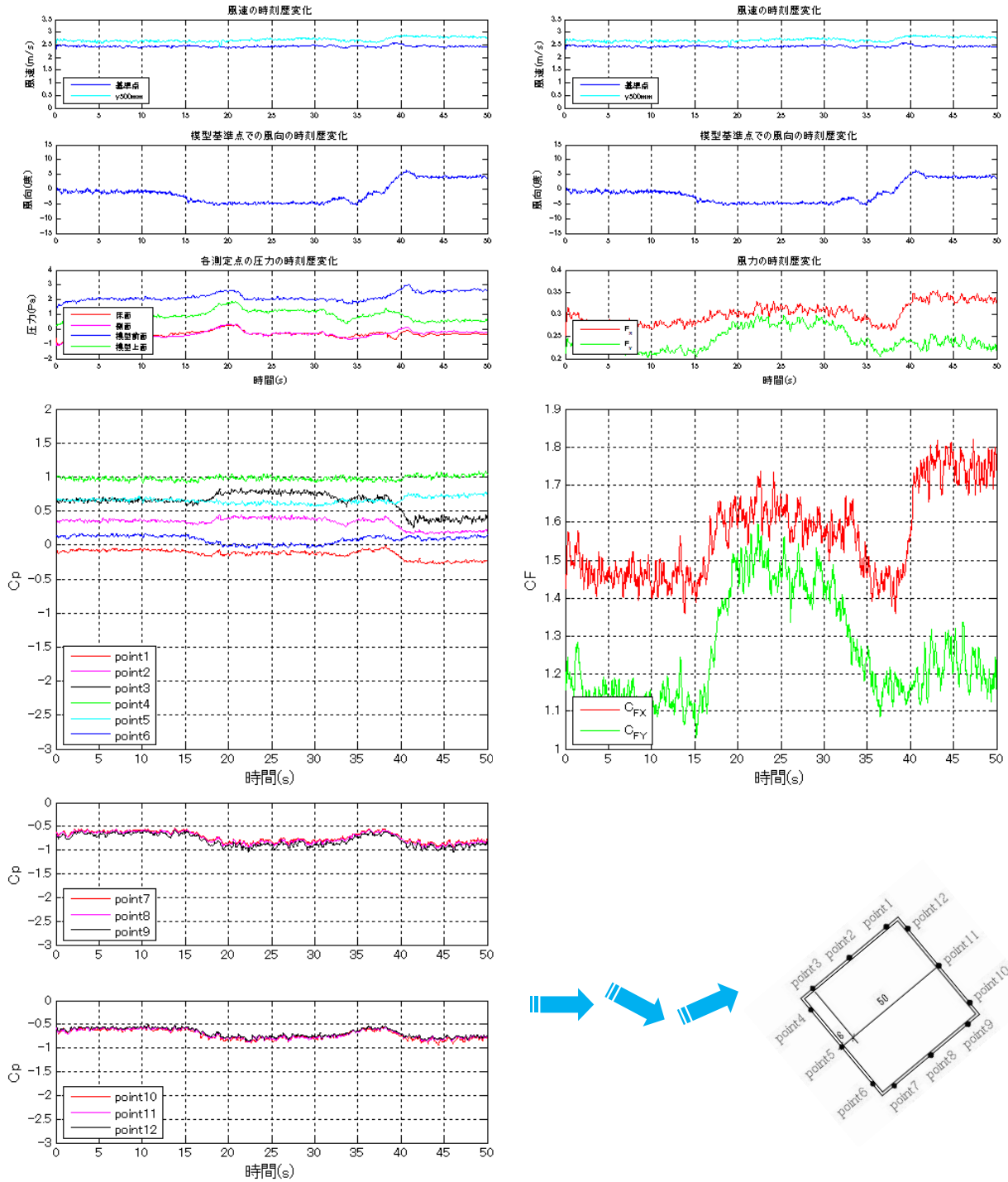


図 NDU5 の 10 秒変化時の模型角度 40° での時刻歴変化

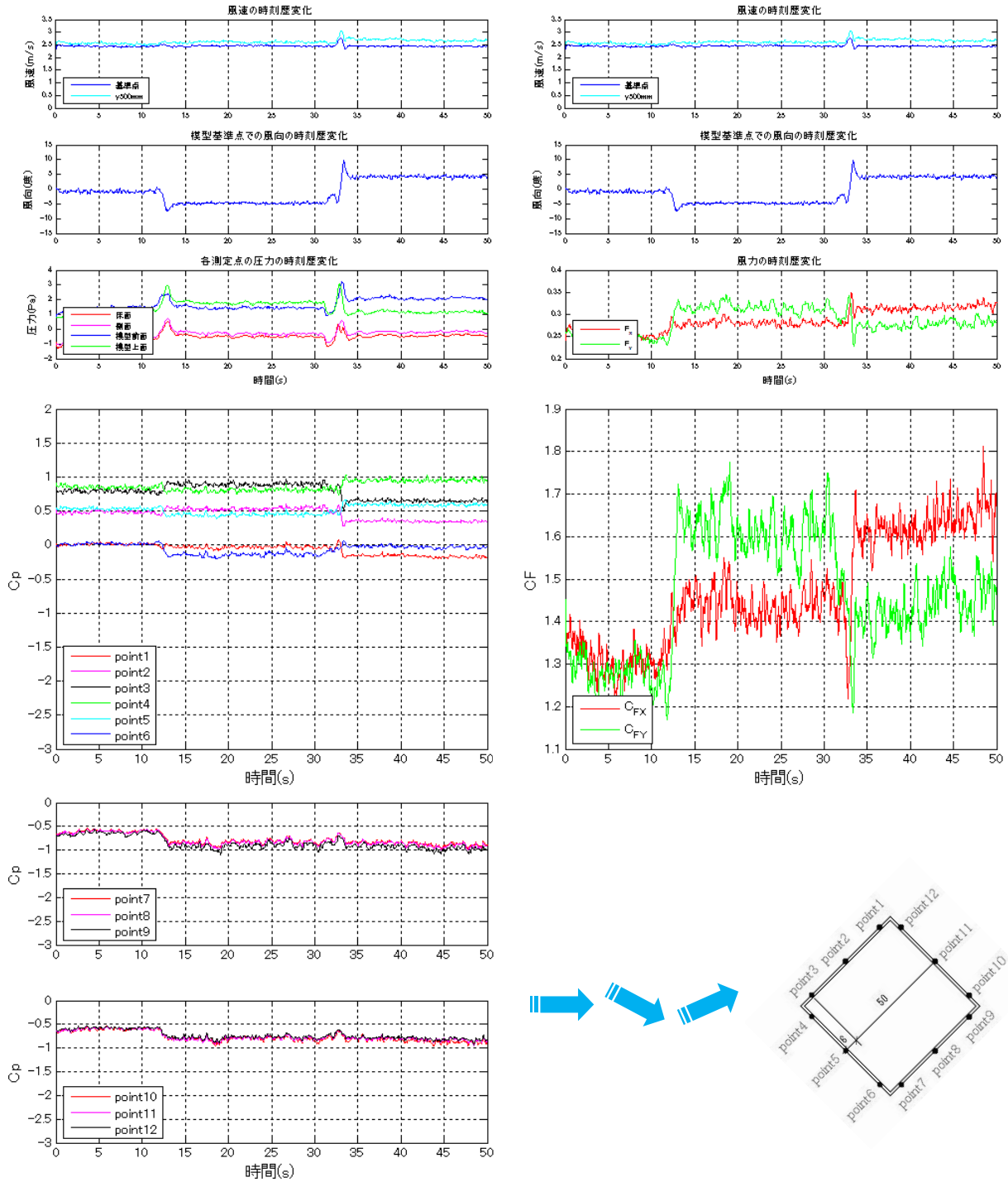


図 NDU5 の 2 秒変化時の模型角度 45° での時刻歴変化

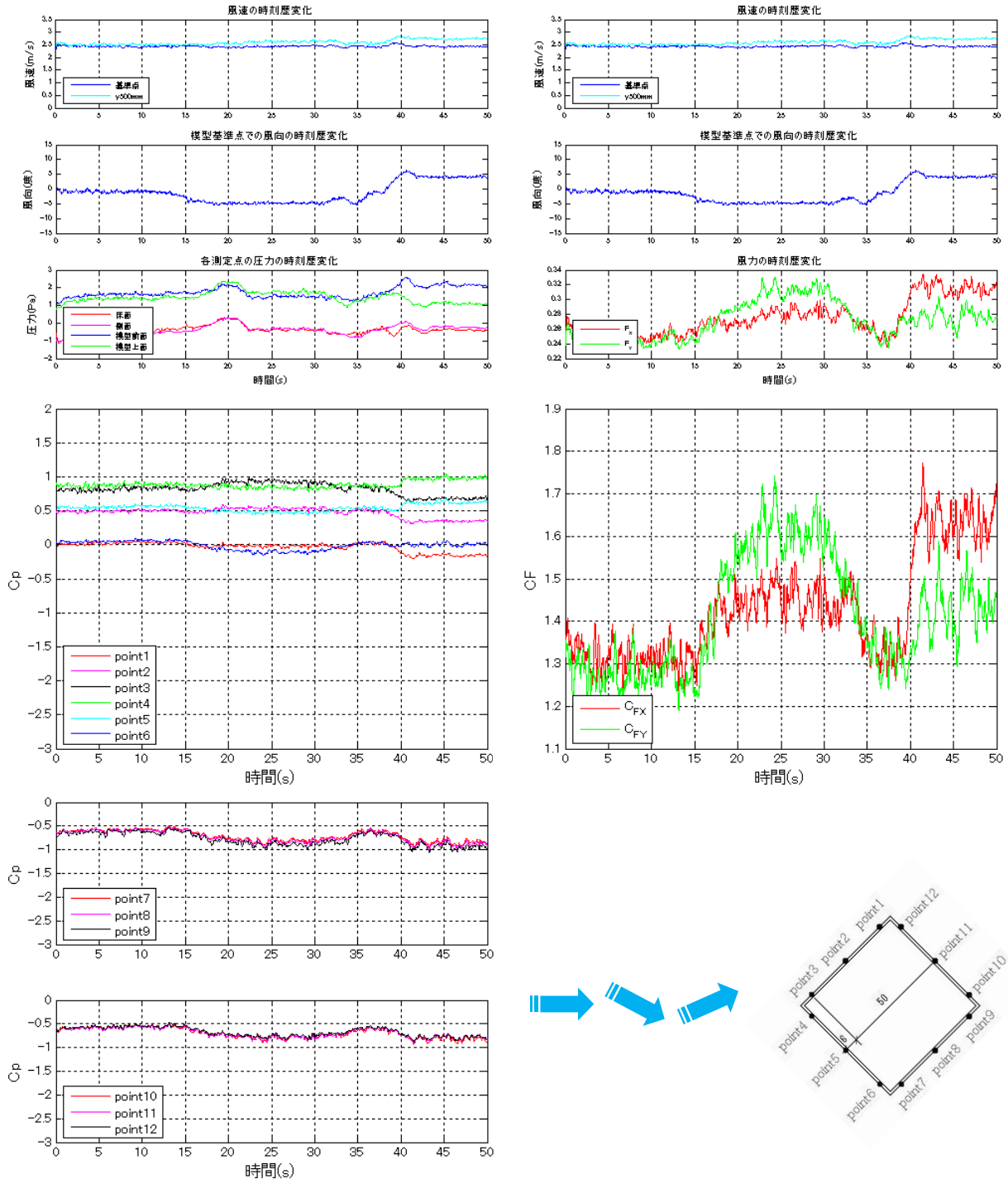


図 NDU5 の 10 秒変化時の模型角度 45° での時刻歴変化

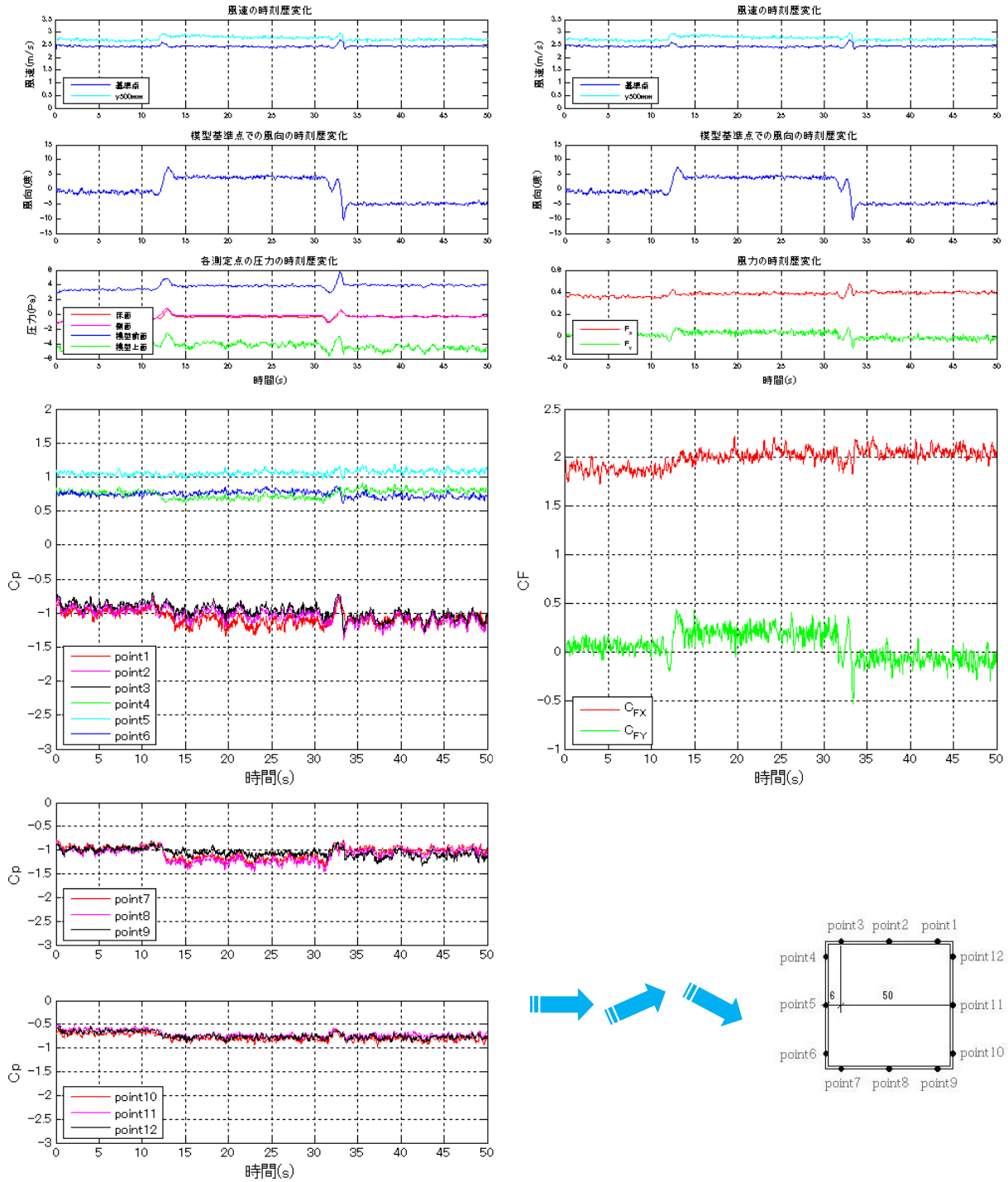


図 NUD5 の 2 秒変化時の模型角度 0° での時刻歴変化

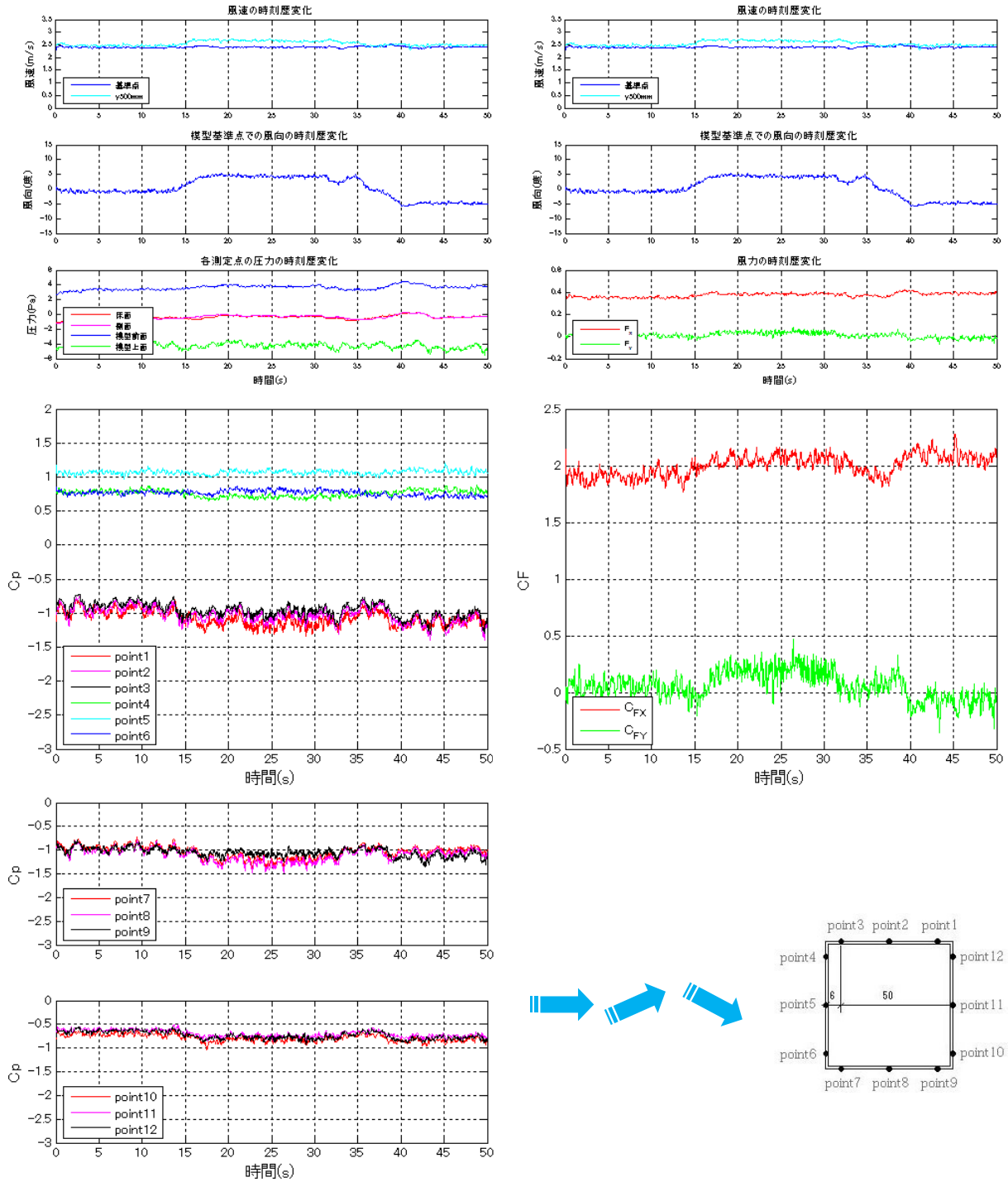


図 NUD5 の 10 秒変化時の模型角度 0° での時刻歴変化

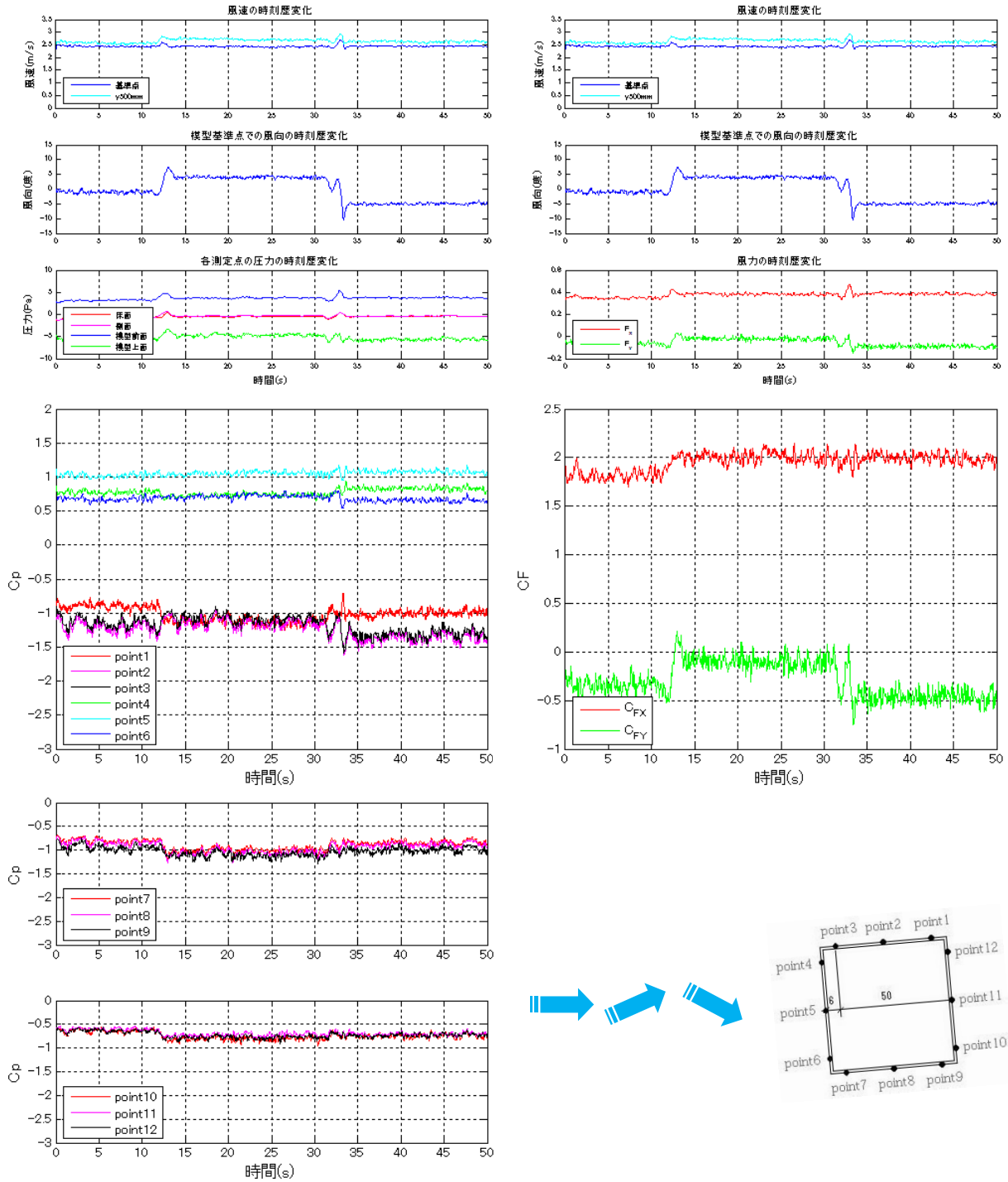


図 NUD5 の 2 秒変化時の模型角度 5° での時刻歴変化

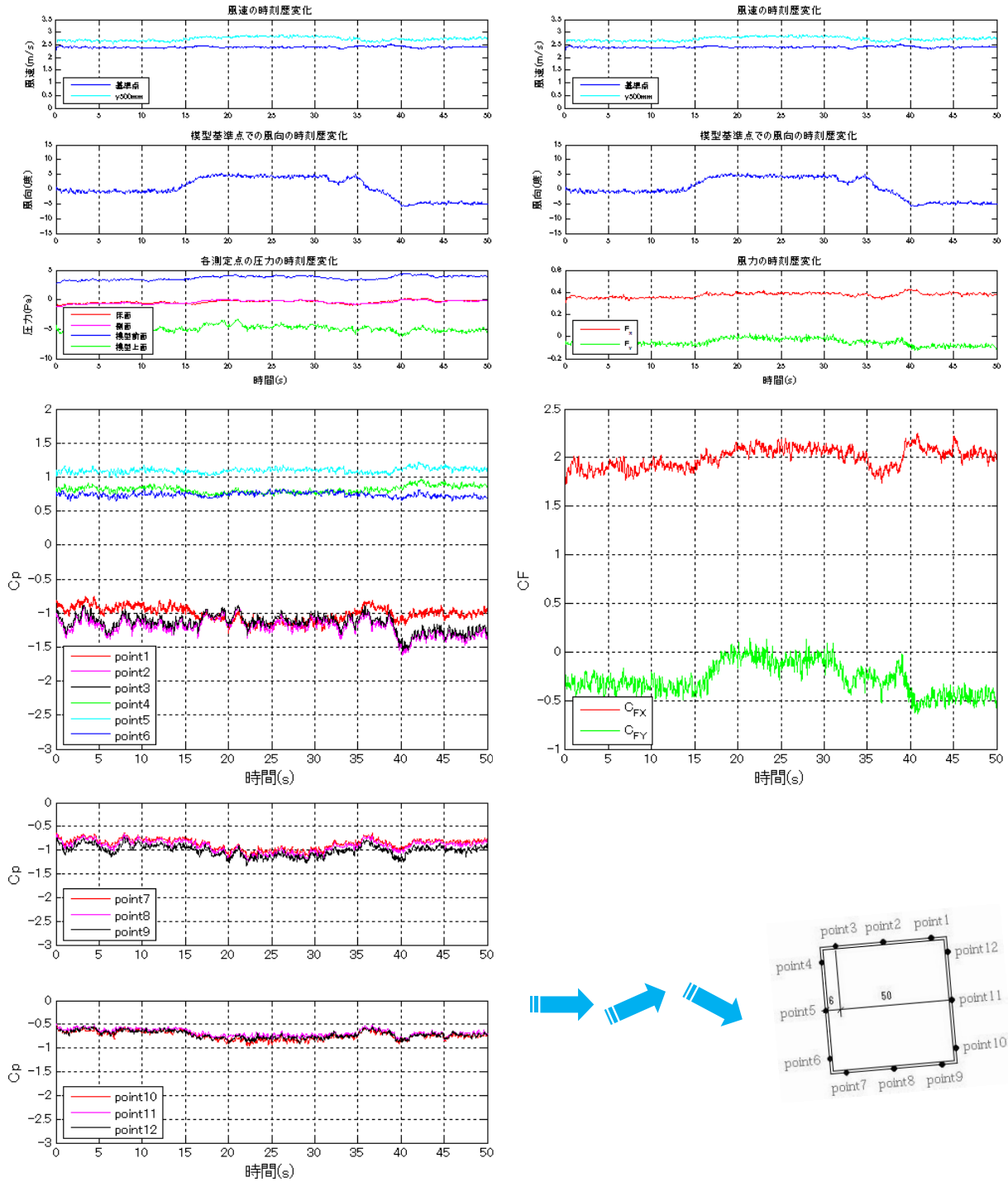


図 NUD5 の 10 秒変化時の模型角度 5° での時刻歴変化

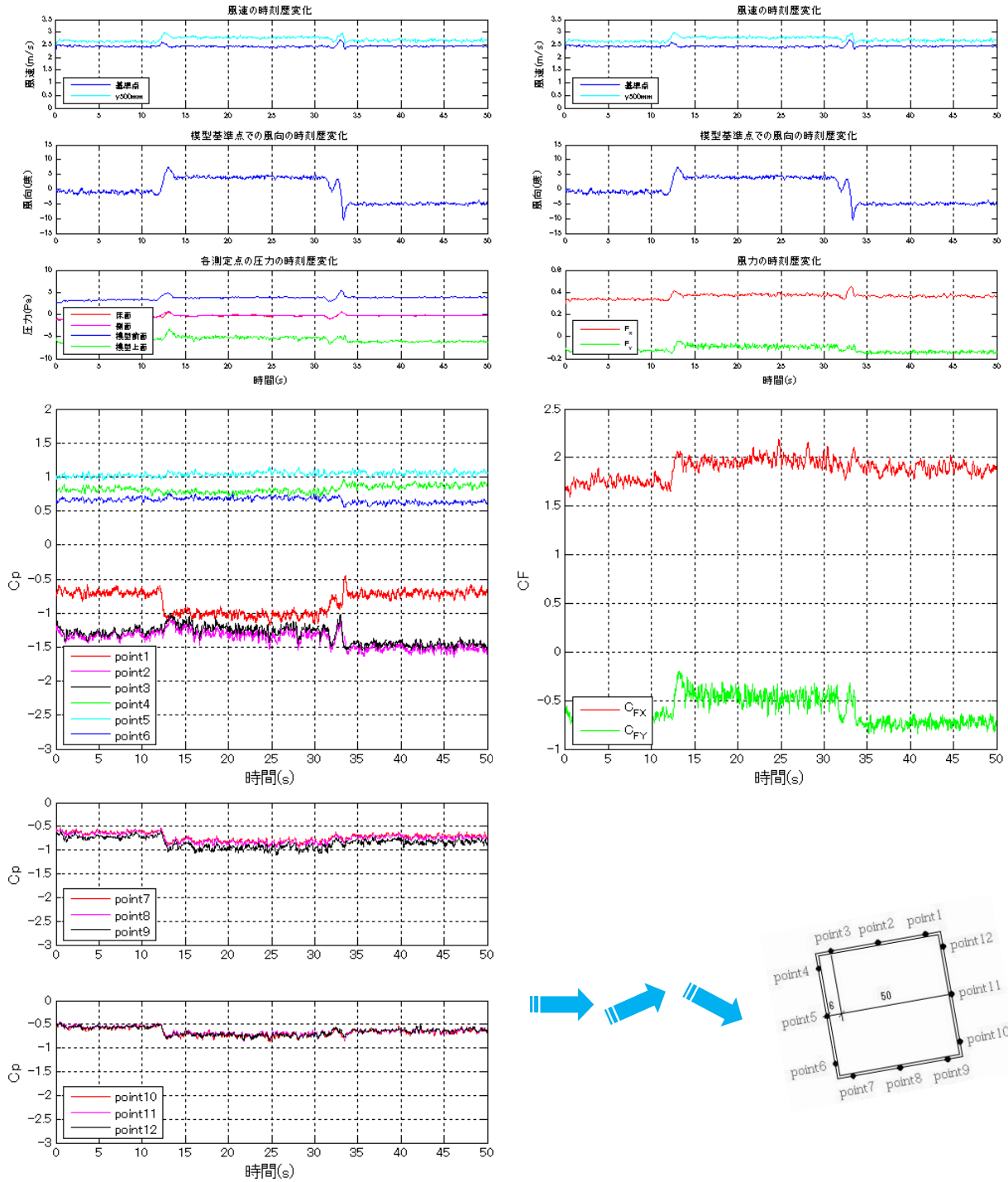


図 NUD5 の 2 秒変化時の模型角度 10° での時刻歴変化

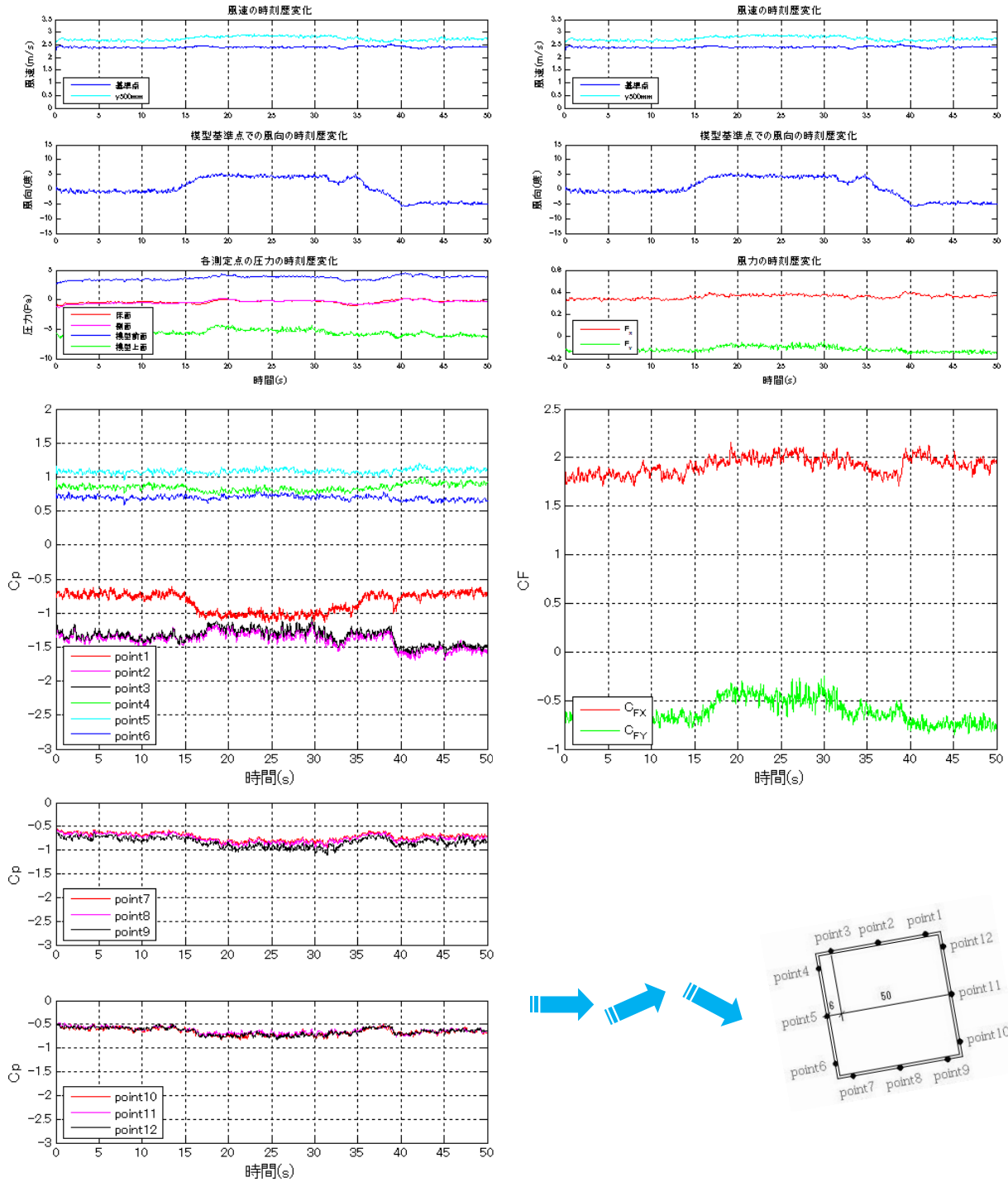


図 NUD5 の 10 秒変化時の模型角度 10° での時刻歴変化

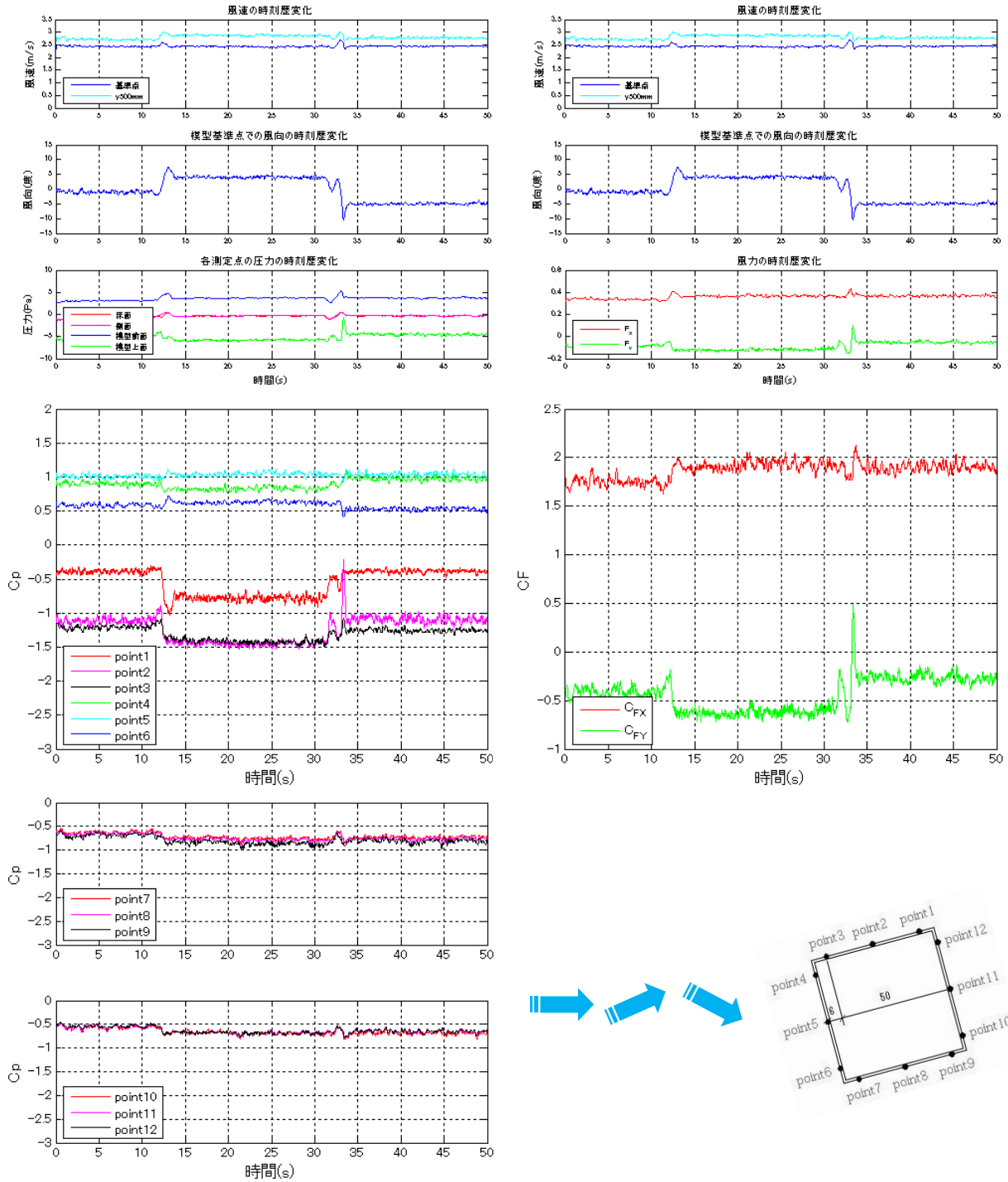


図 NUD5 の 2 秒変化時の模型角度 15° での時刻歴変化

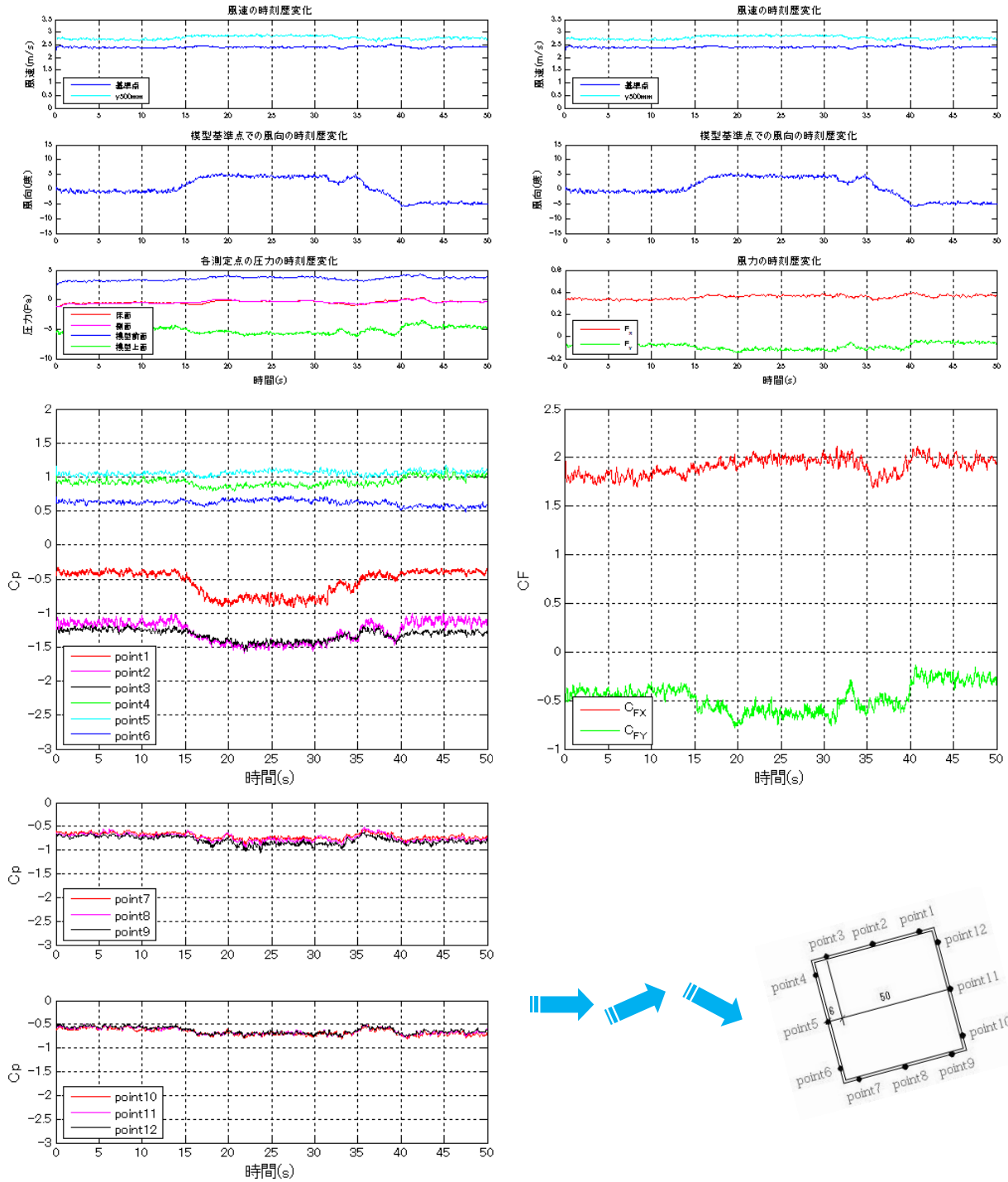


図 NUD5 の 10 秒変化時の模型角度 15° での時刻歴変化

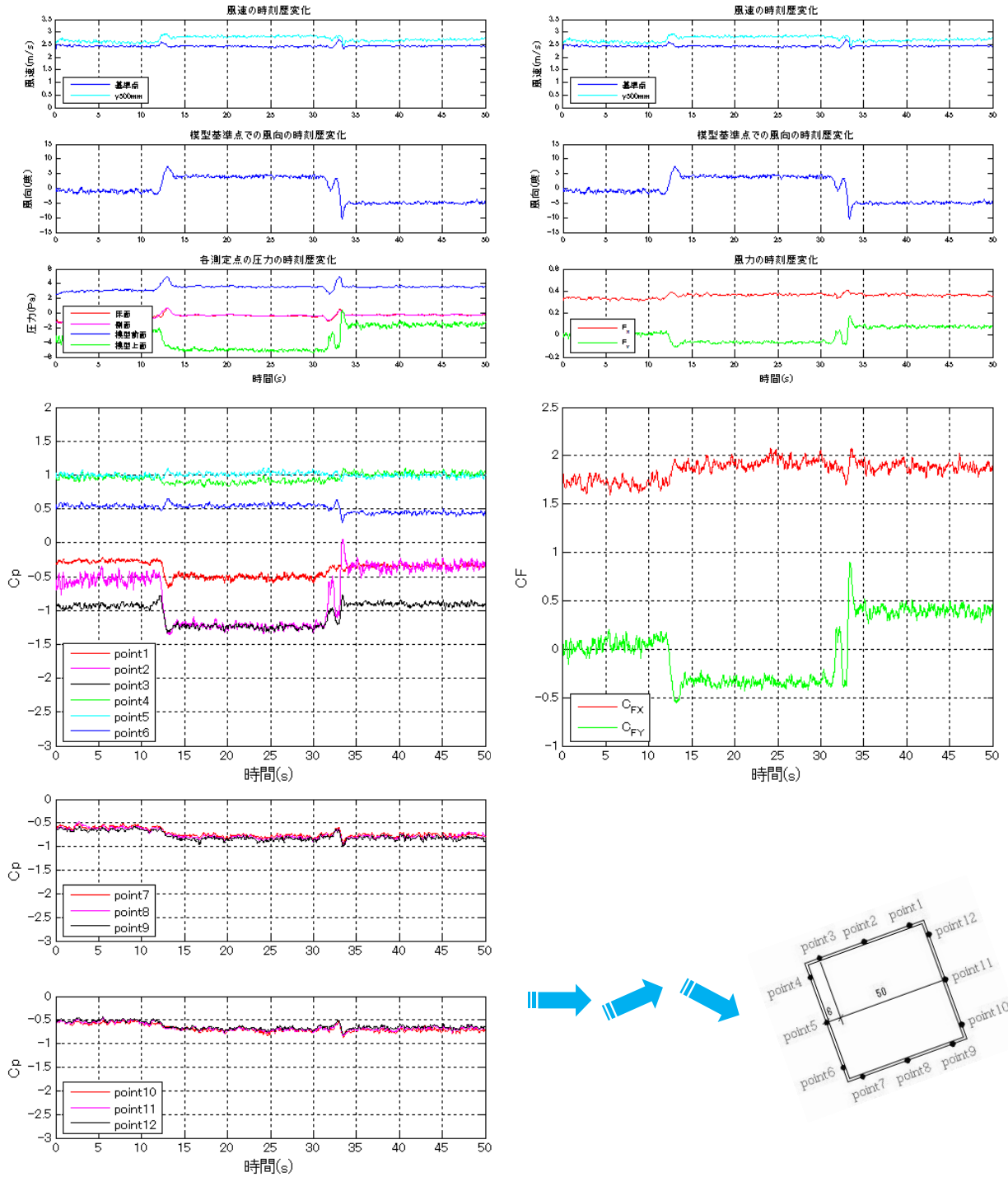


図 NUD5 の 2 秒変化時の模型角度 20° での時刻歴変化

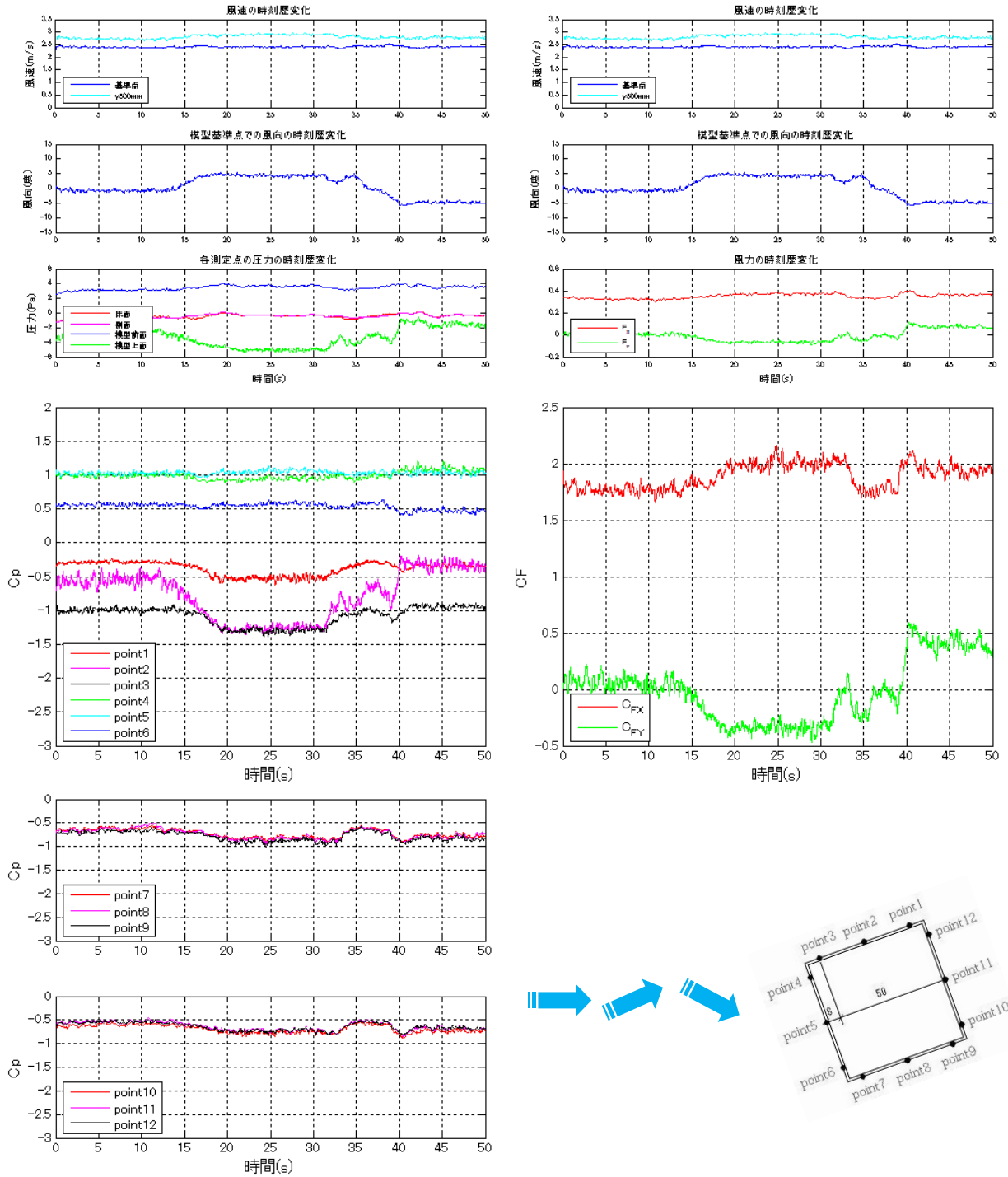


図 NUD5 の 10 秒変化時の模型角度 20° での時刻歴変化

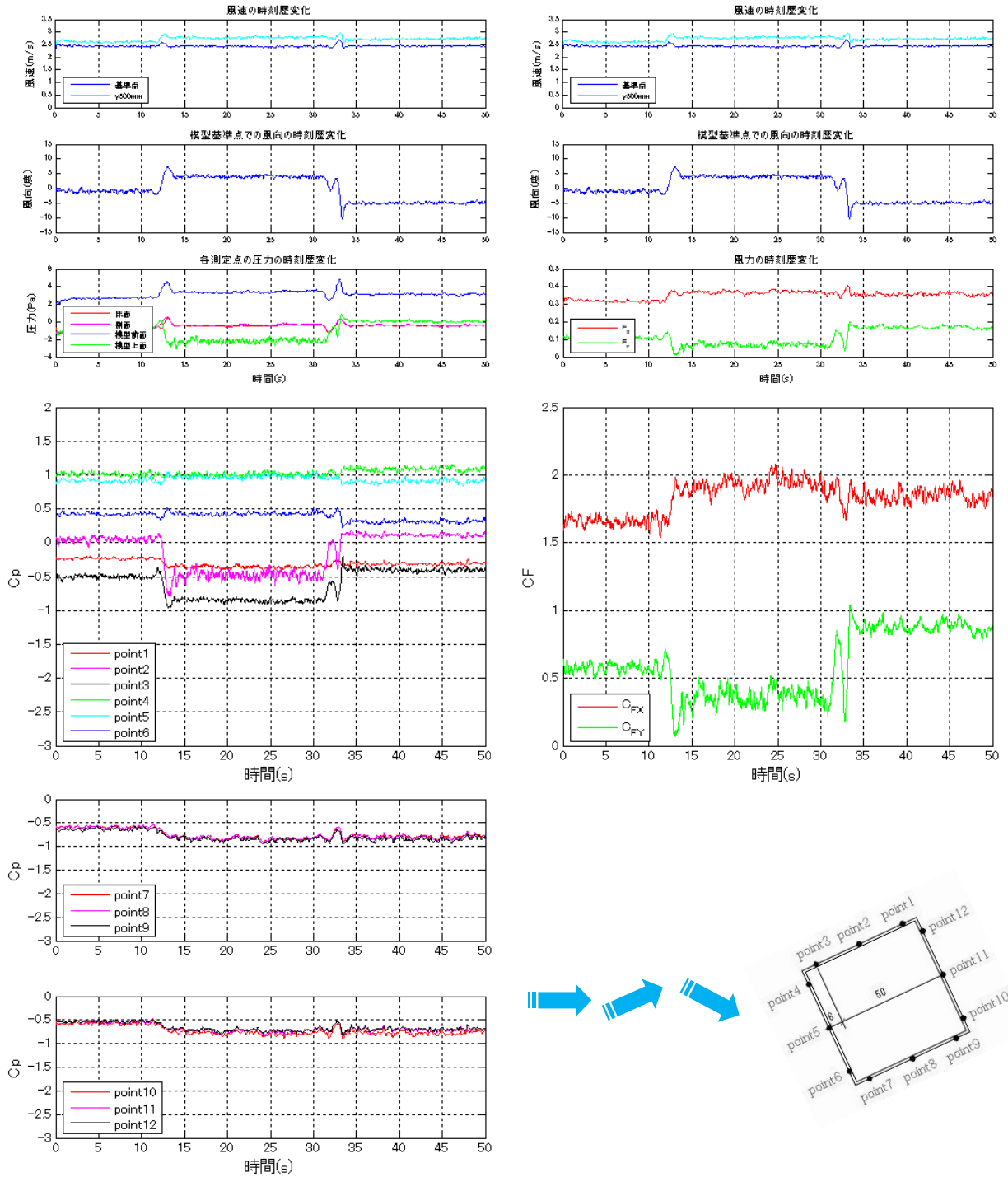


図 NUD5 の 2 秒変化時の模型角度 25° での時刻歴変化

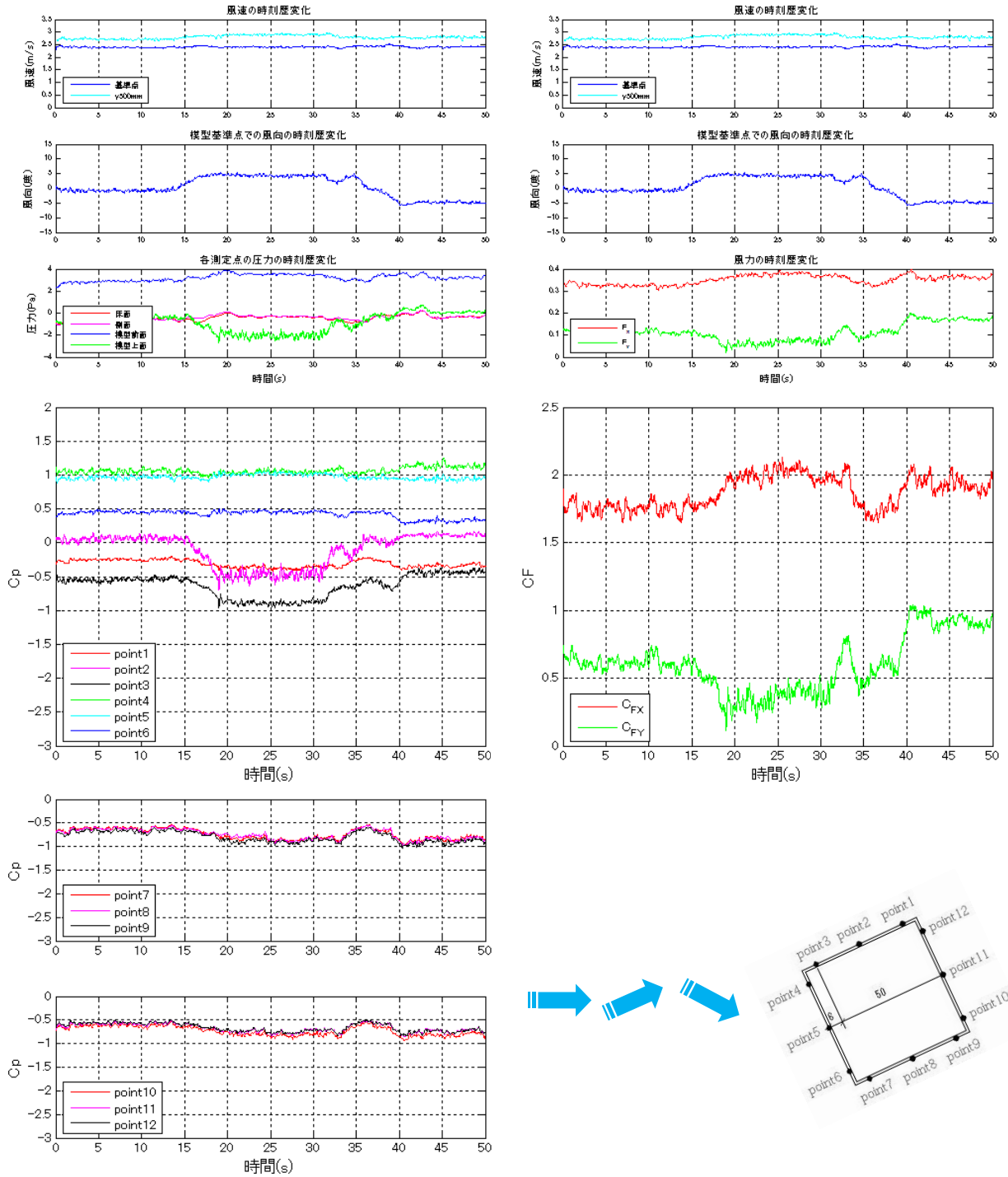


図 NUD5 の 10 秒変化時の模型角度 25° での時刻歴変化

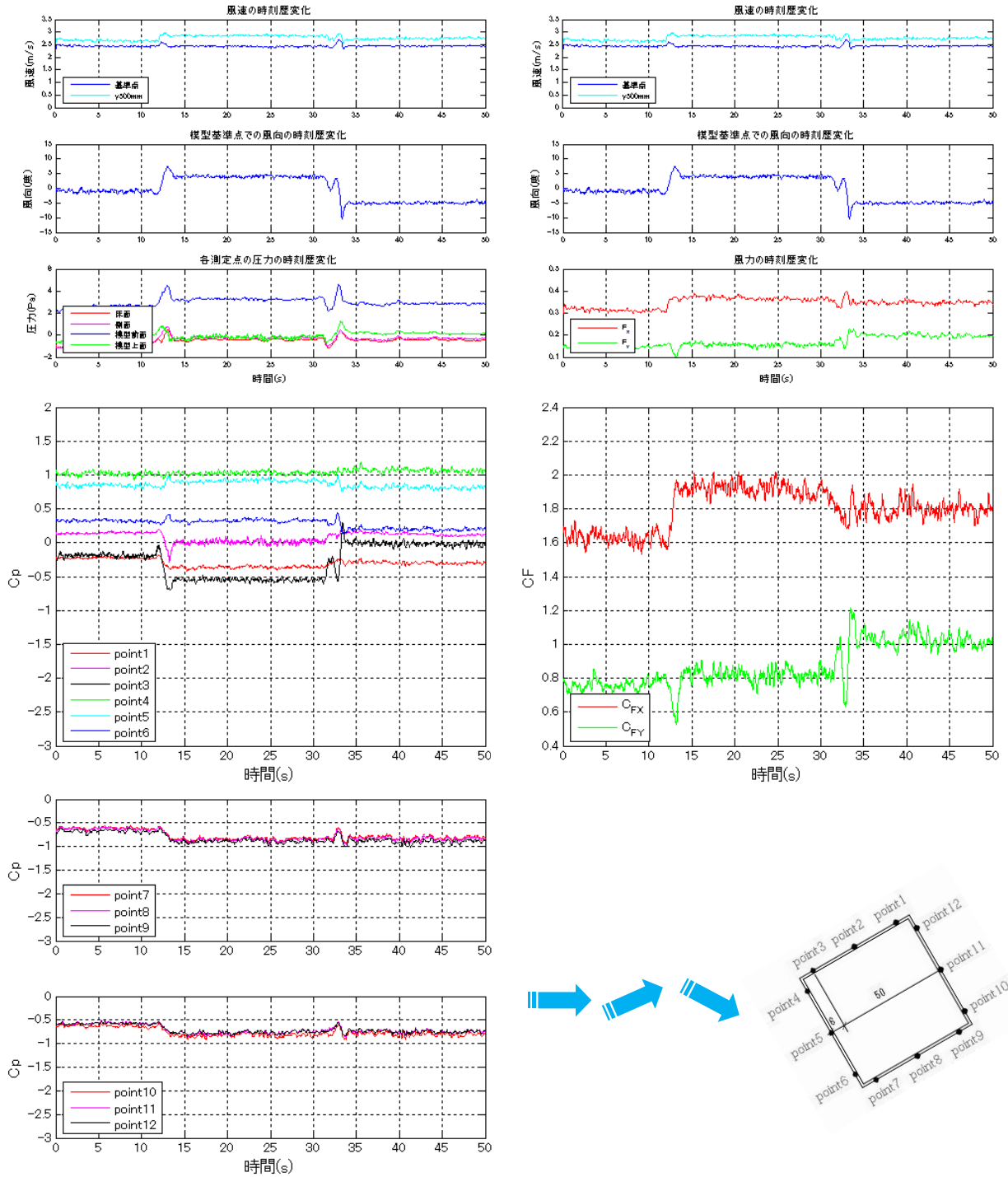


図 NUD5 の 2 秒変化時の模型角度 30° での時刻歴変化

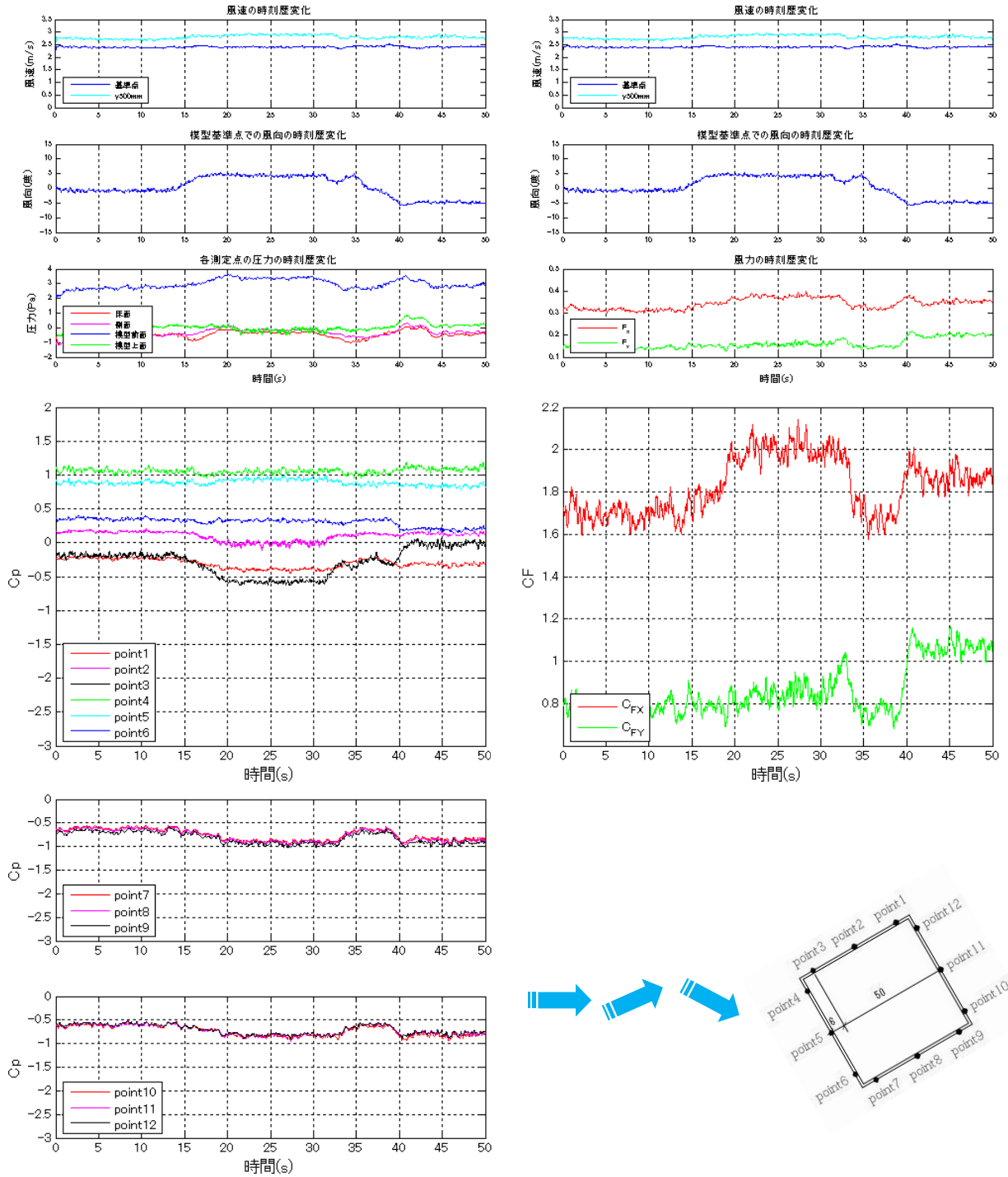


図 NUD5 の 10 秒変化時の模型角度 30° での時刻歴変化

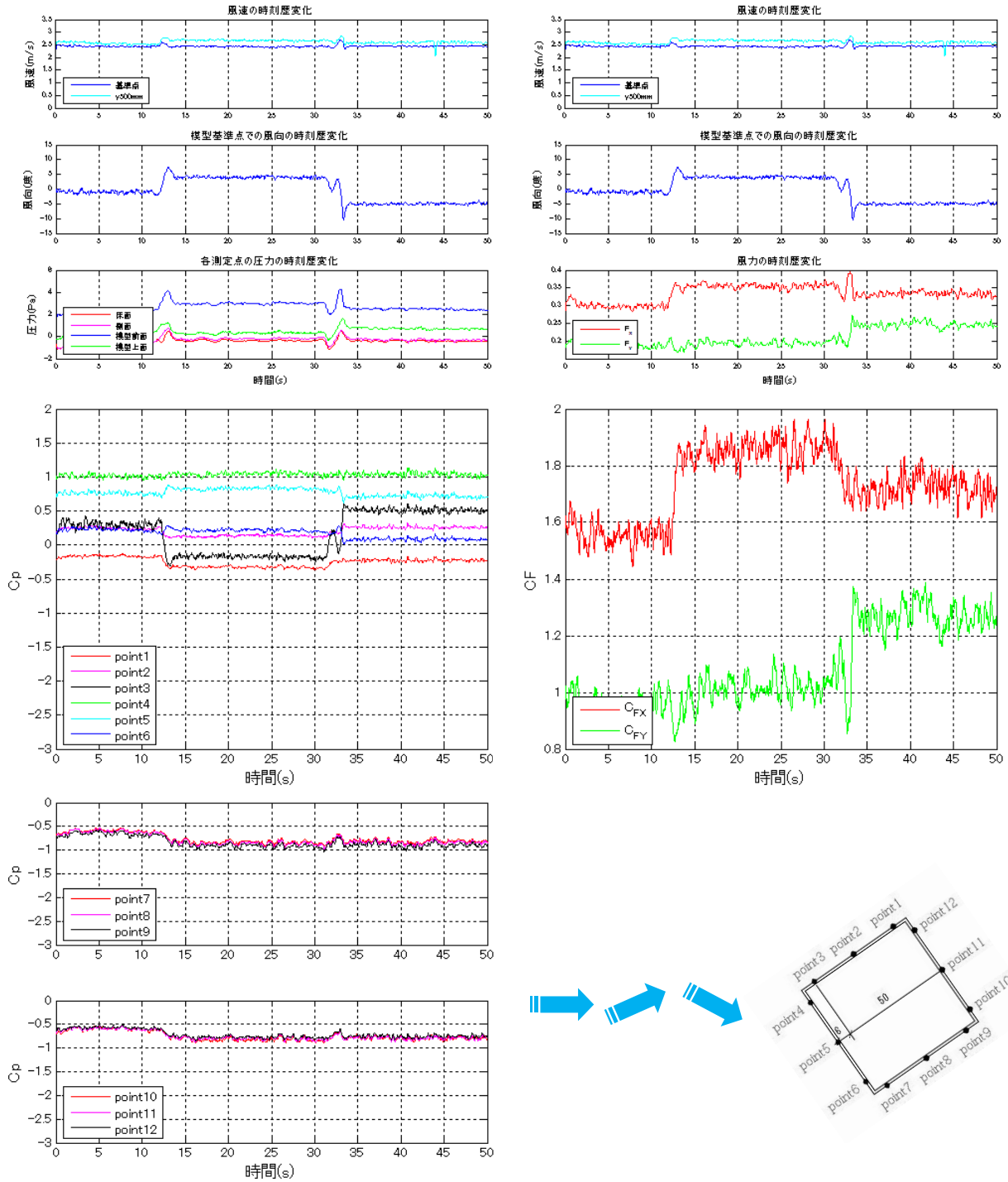


図 NUD5 の 2 秒変化時の模型角度 35° での時刻歴変化

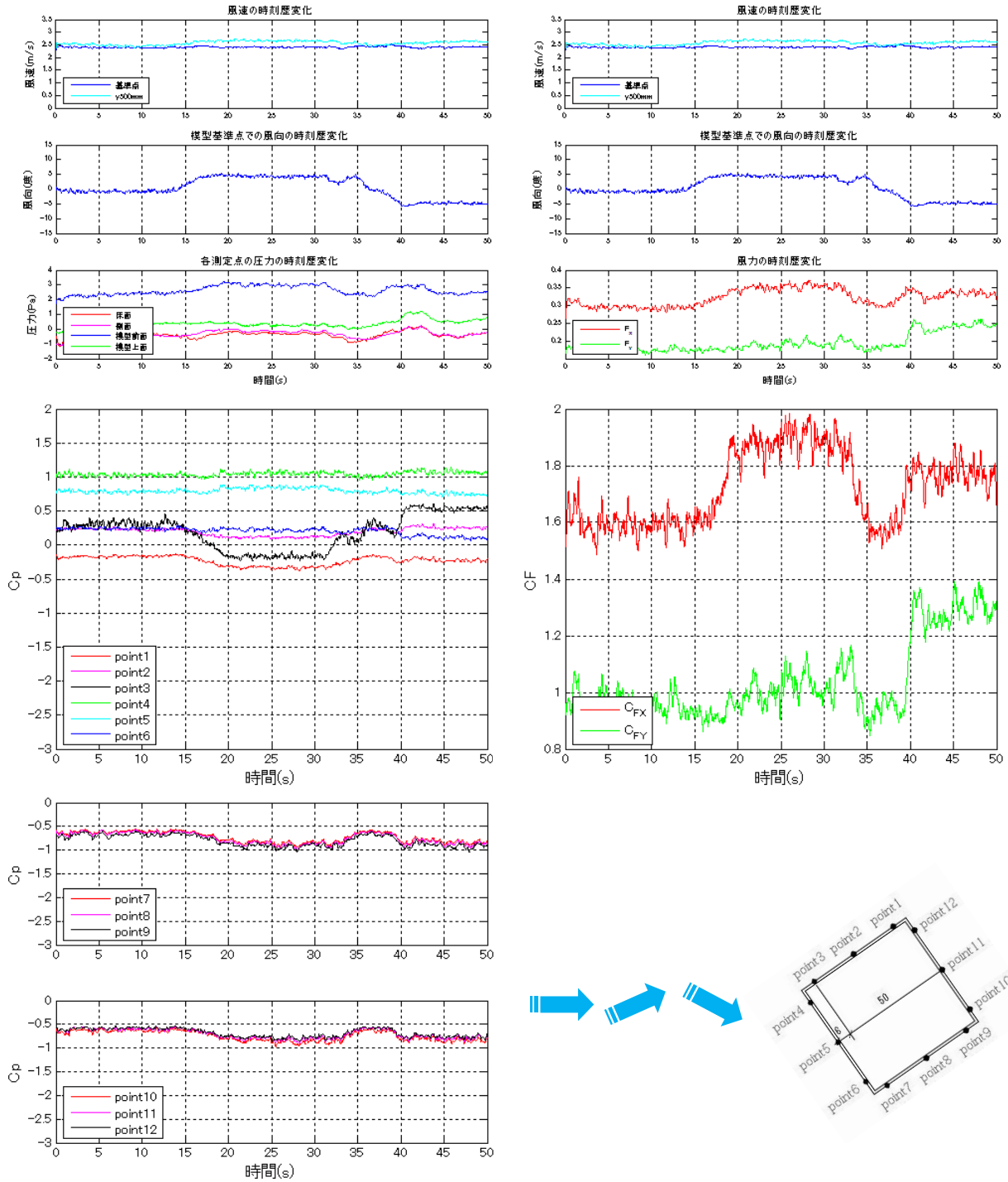


図 NUD5 の 10 秒変化時の模型角度 35° での時刻歴変化

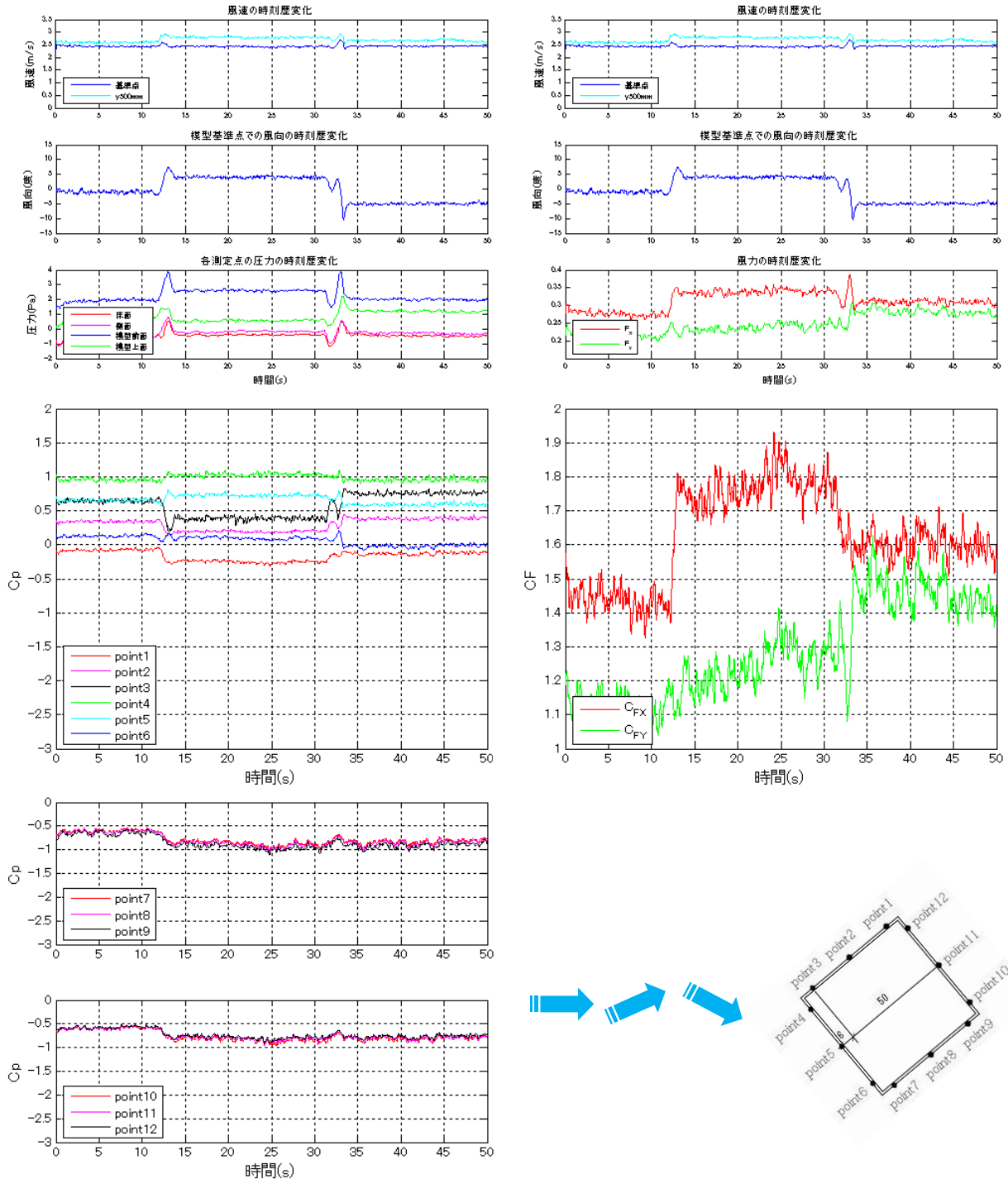


図 NUD5 の 2 秒変化時の模型角度 40° での時刻歴変化

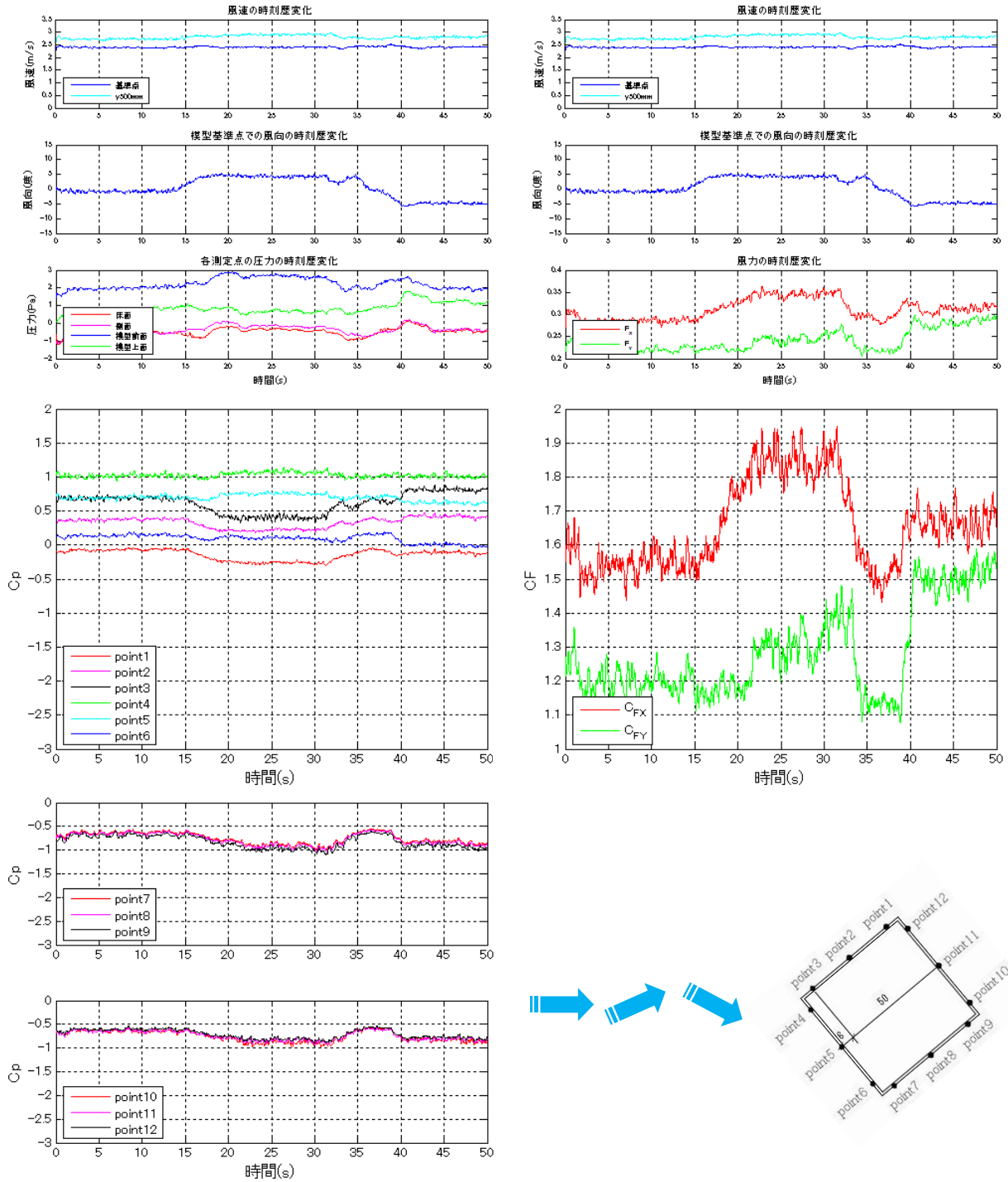


図 NUD5 の 10 秒変化時の模型角度 40° での時刻歴変化

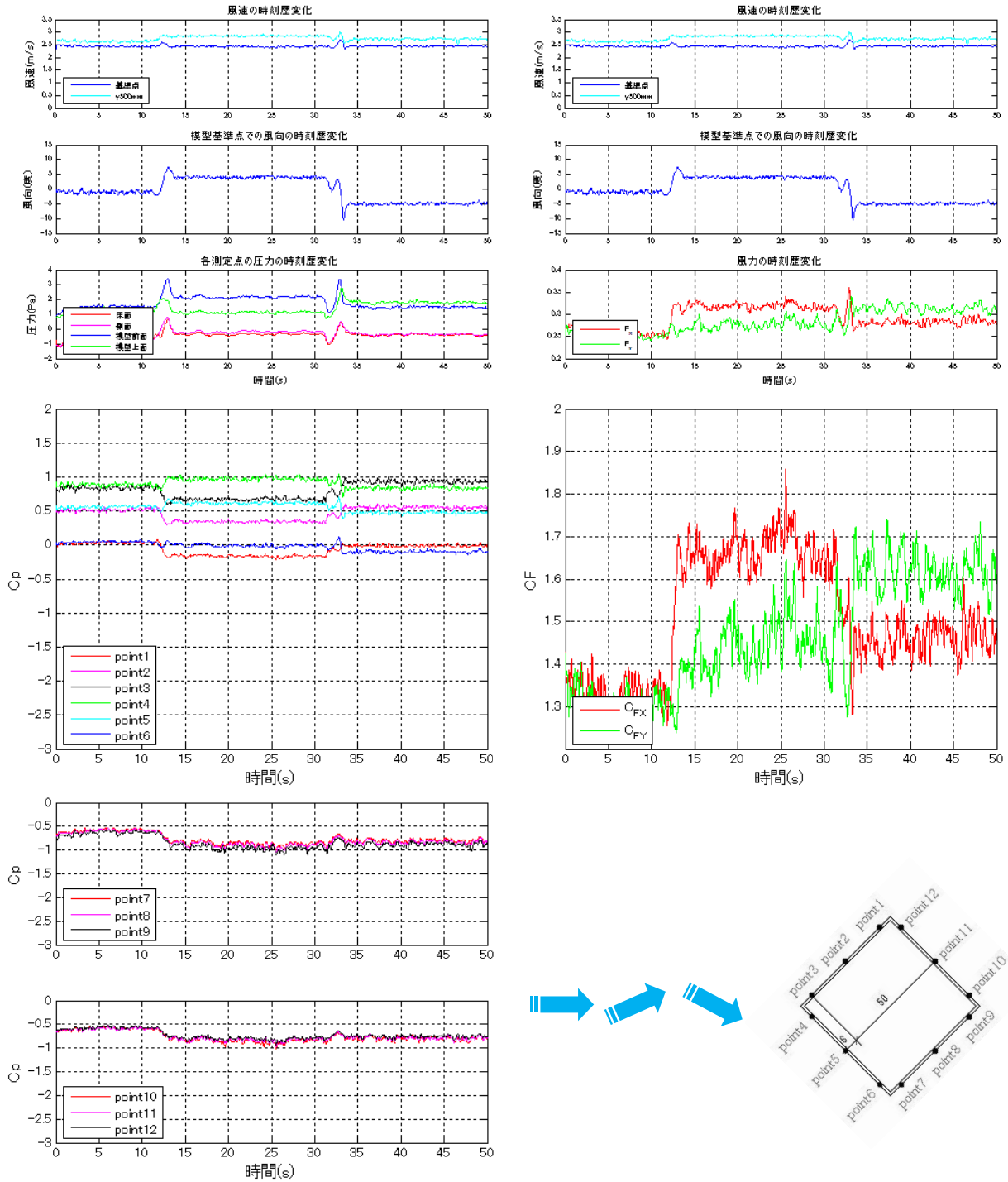


図 NUD5 の 2 秒変化時の模型角度 45° での時刻歴変化

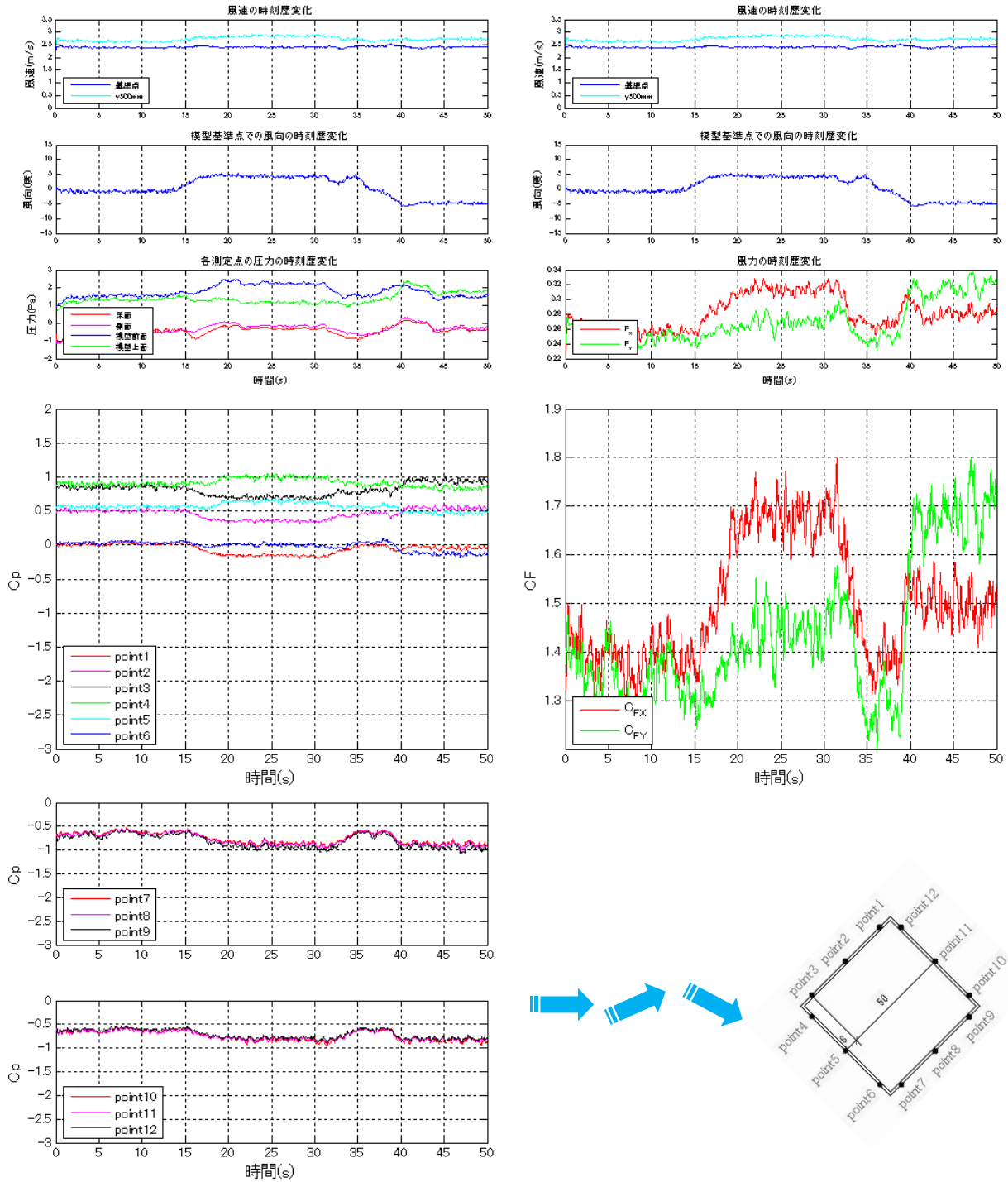


図 NUD5 の 10 秒変化時の模型角度 45° での時刻歴変化

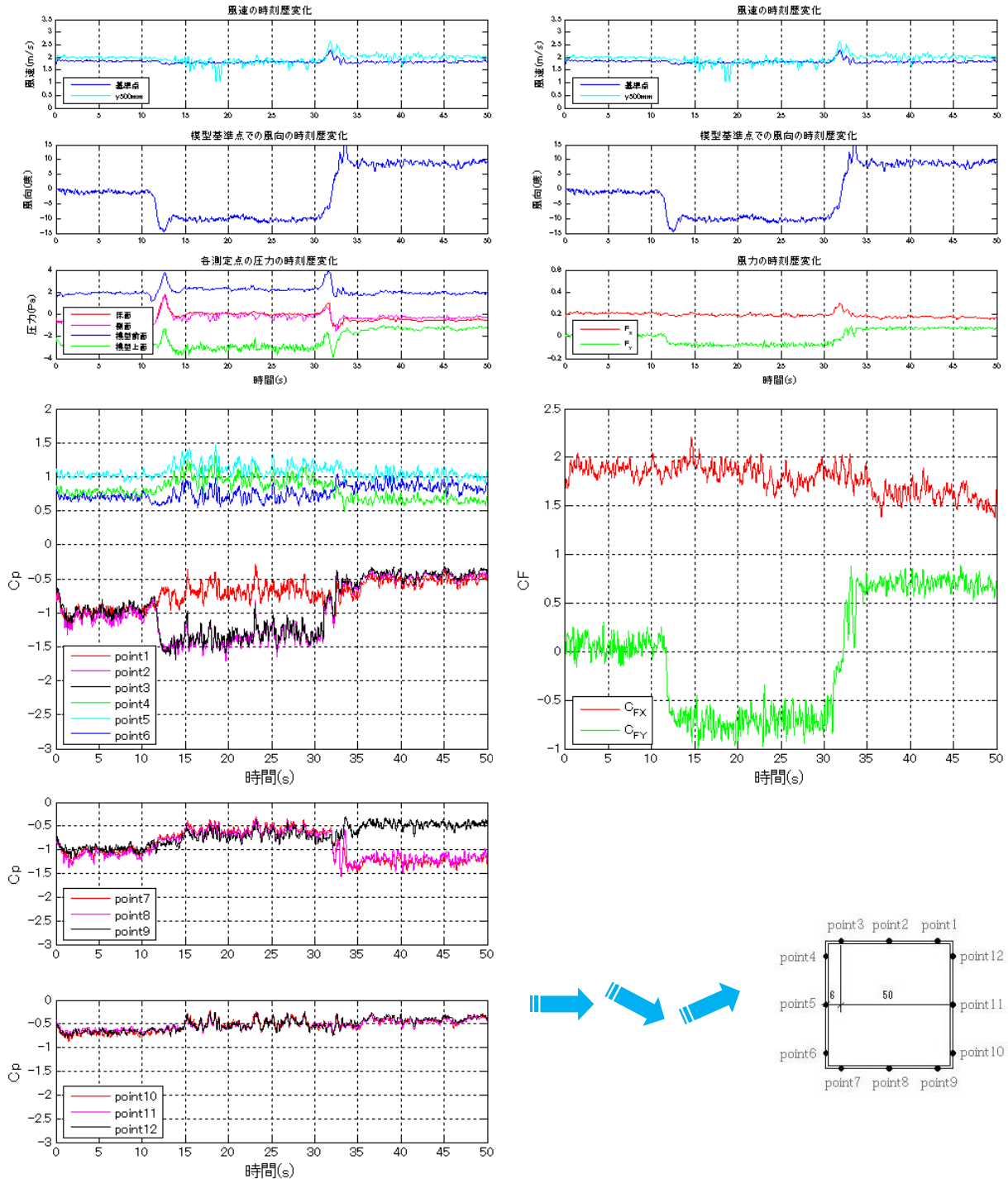


図 NDU10 の 2 秒変化時の模型角度 0° での時刻歴変化

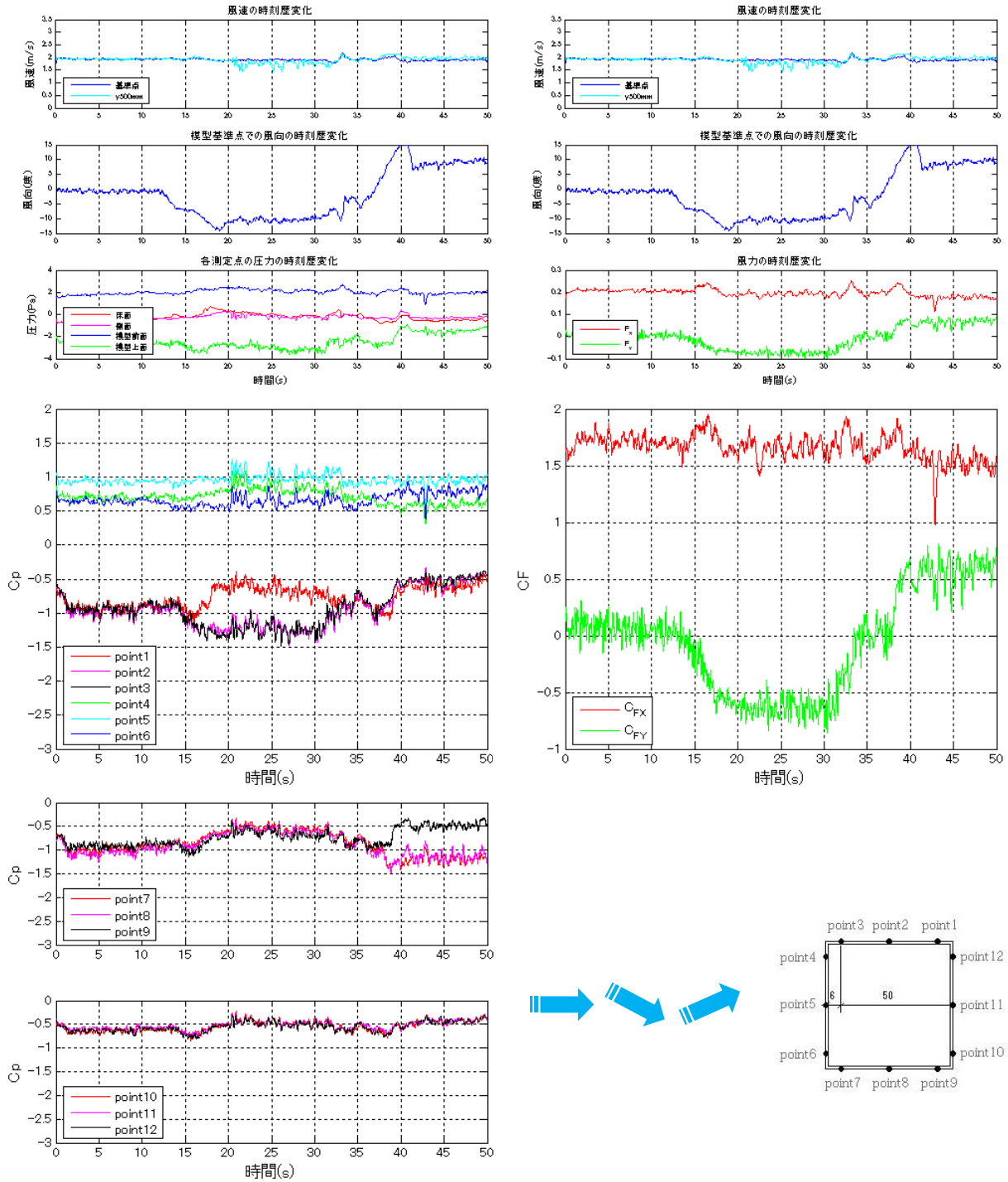


図 NDU10 の 10 秒変化時の模型角度 0° での時刻歴変化

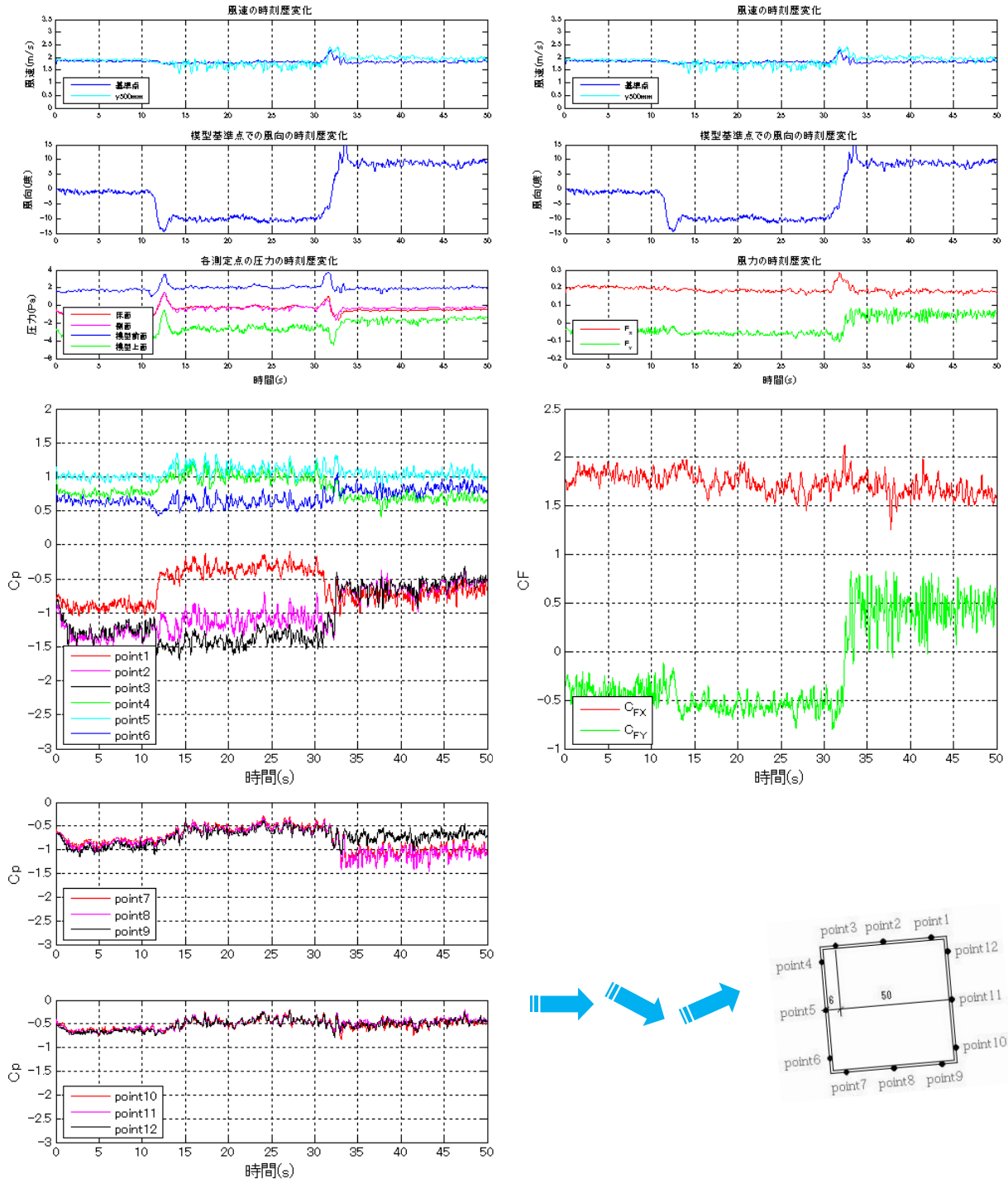


図 NDU10 の 2 秒変化時の模型角度 5° での時刻歴変化

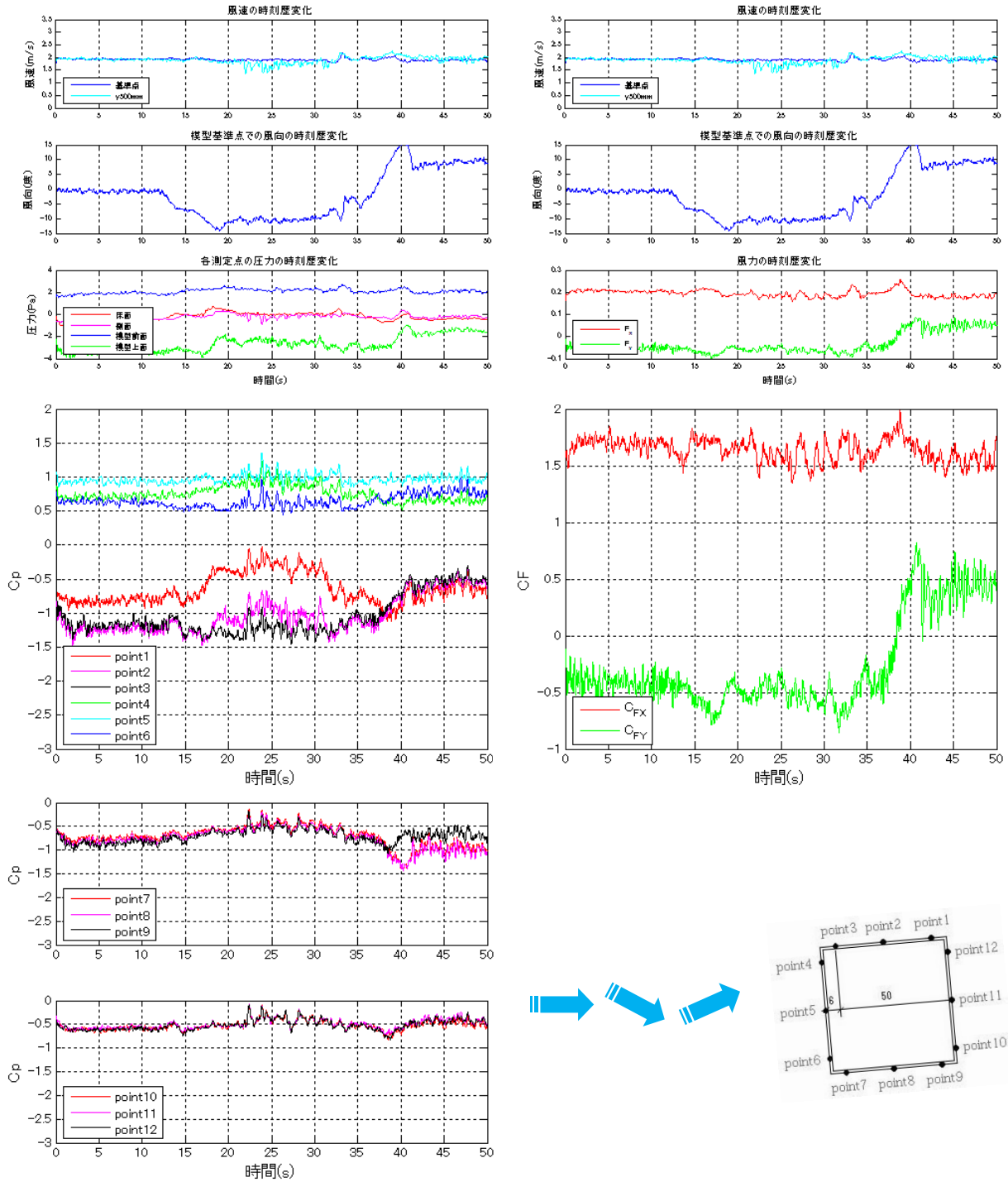


図 NDU10 の 10 秒変化時の模型角度 5° での時刻歴変化

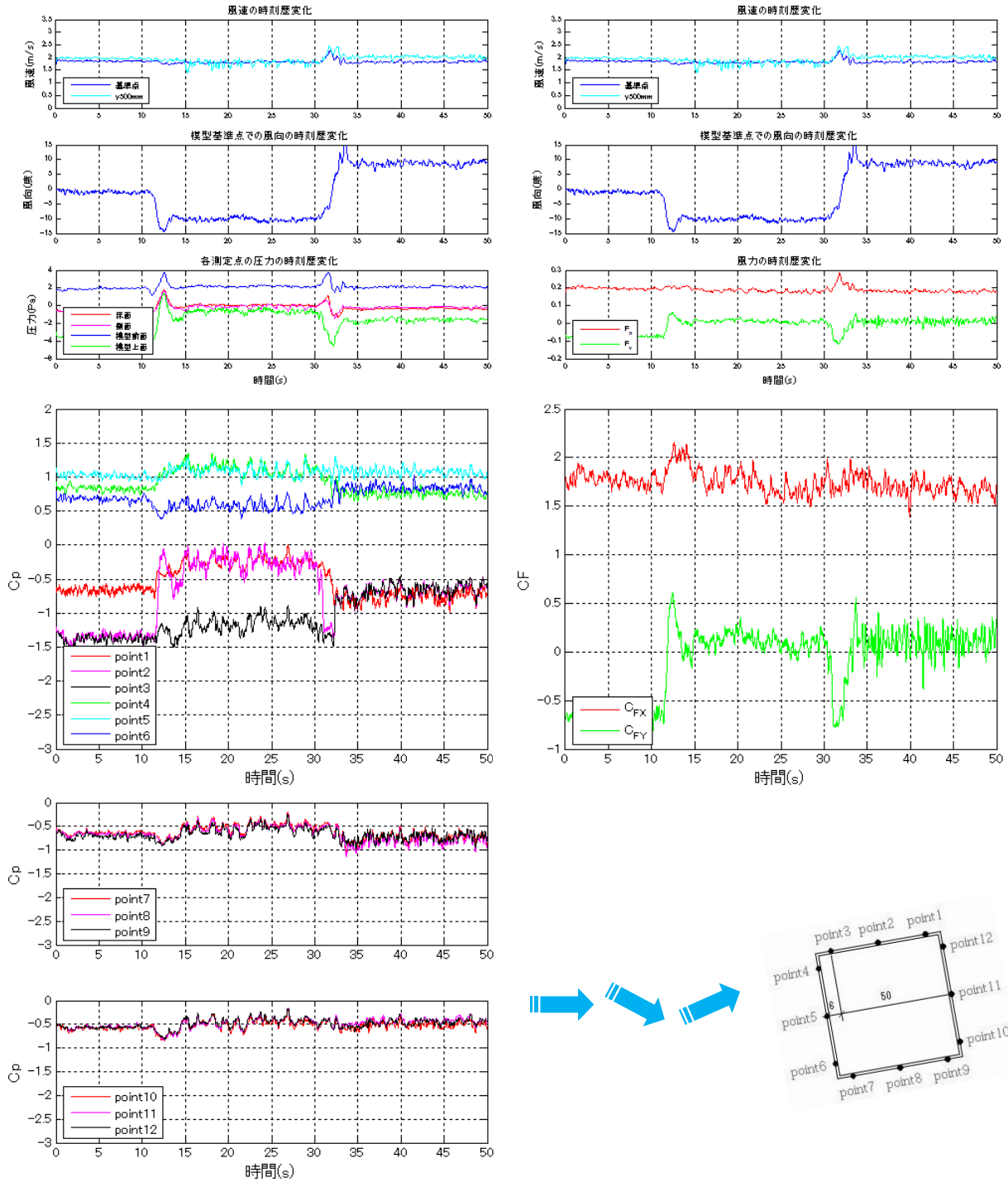


図 NDU10 の 2 秒変化時の模型角度 10° での時刻歴変化

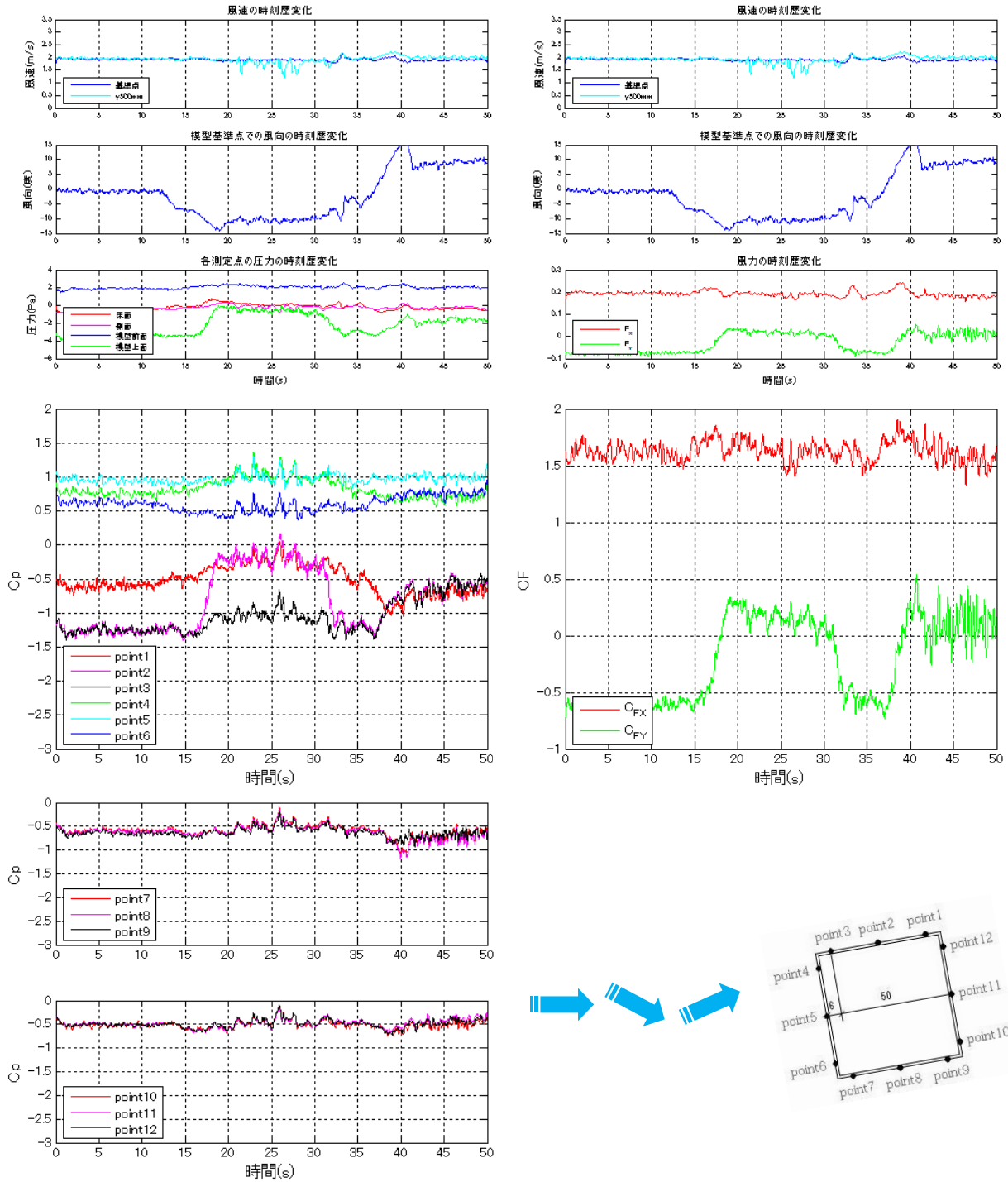


図 NDU10 の 10 秒変化時の模型角度 10° での時刻歴変化

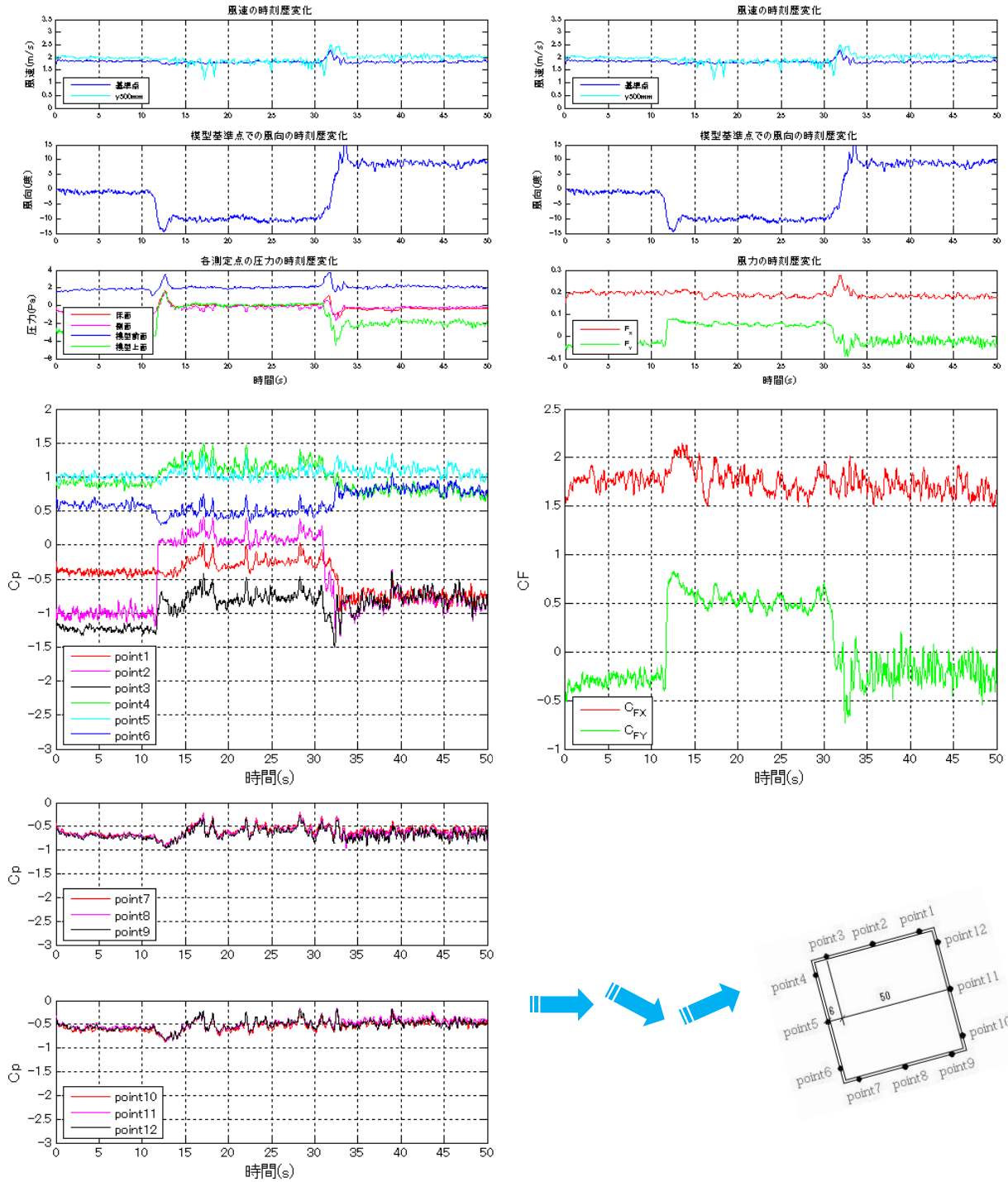


図 NDU10 の 2 秒変化時の模型角度 15° での時刻歴変化

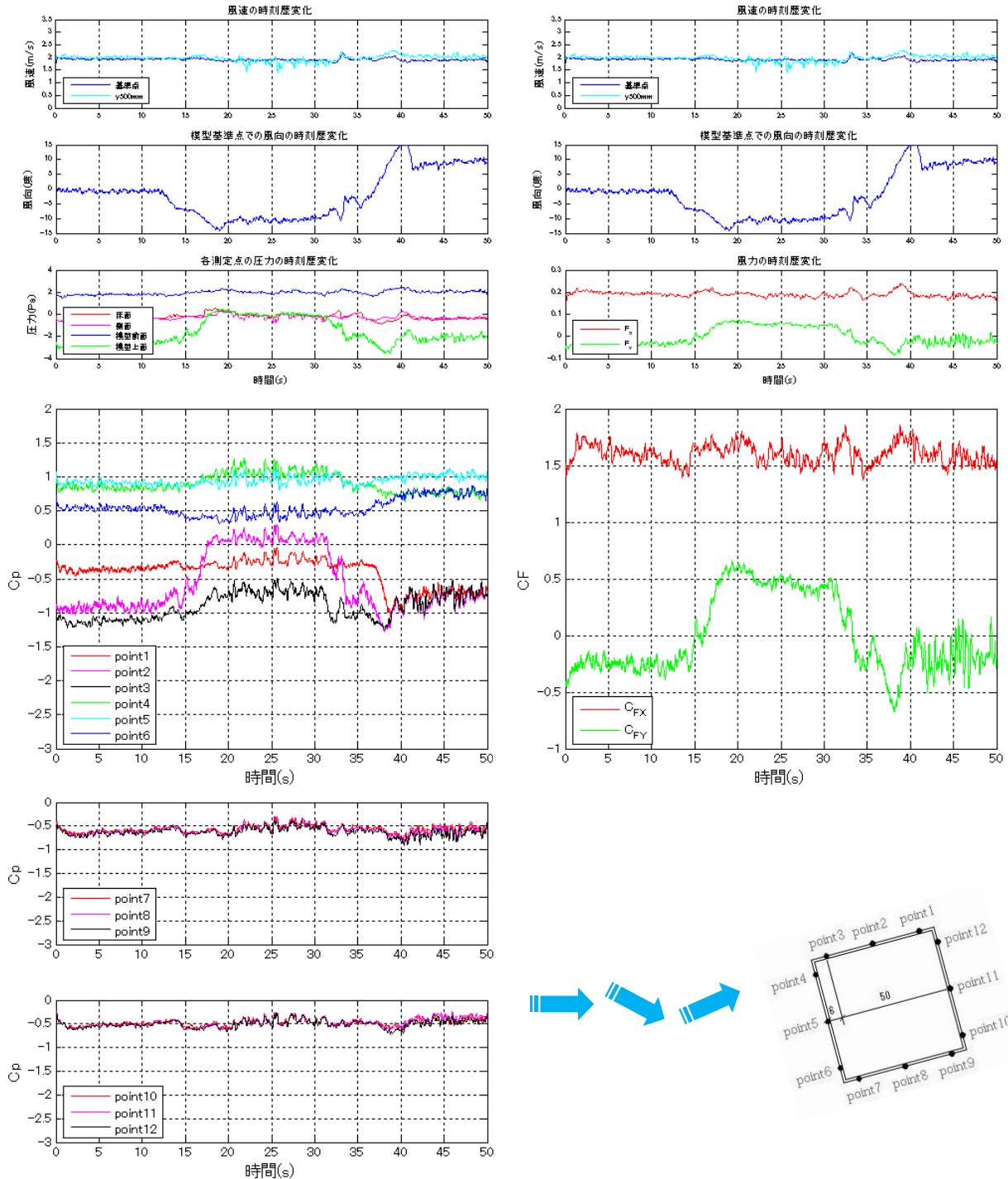


図 NDU10 の 10 秒変化時の模型角度 15° での時刻歴変化

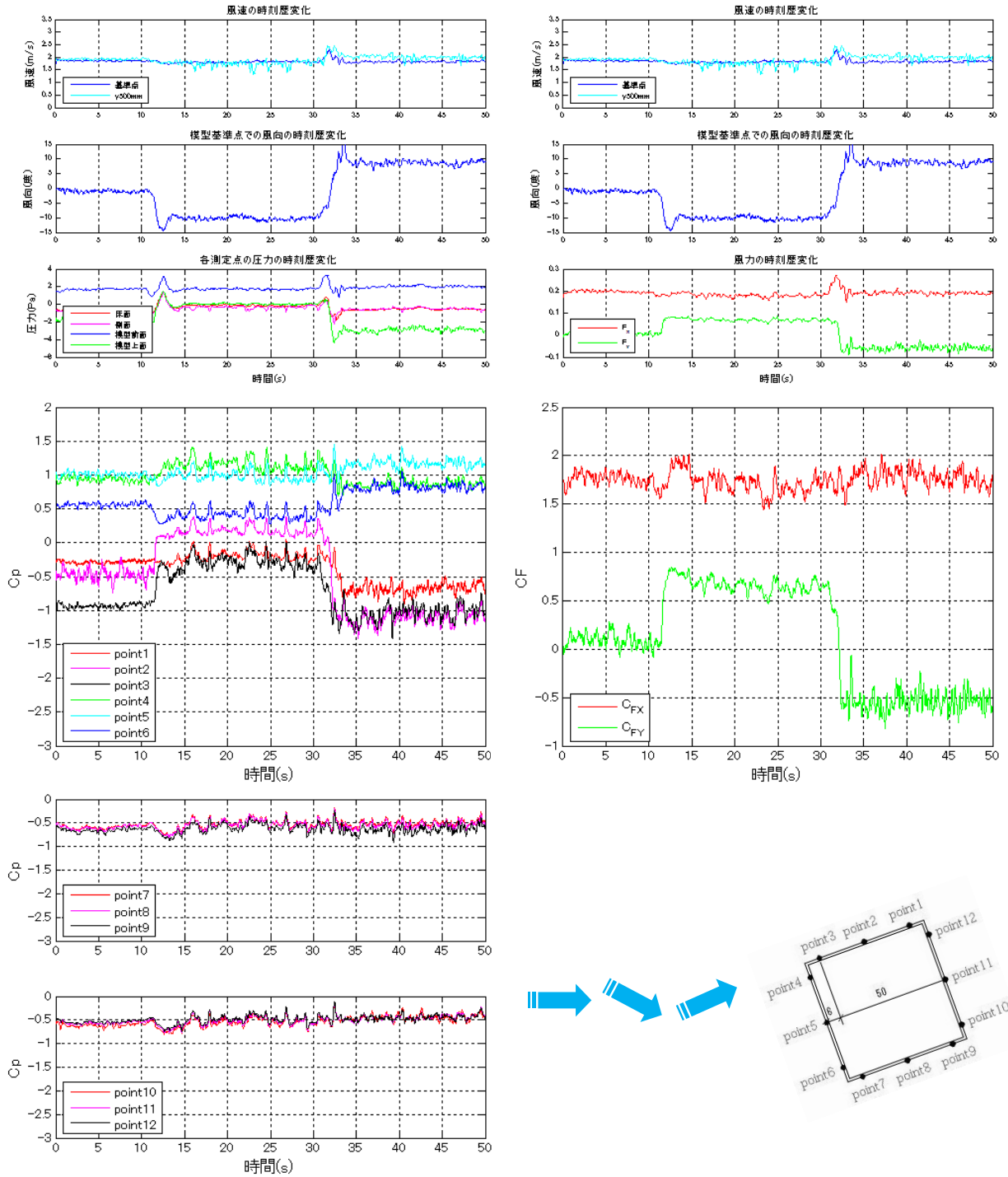


図 NDU10 の 2 秒変化時の模型角度 20° での時刻歴変化

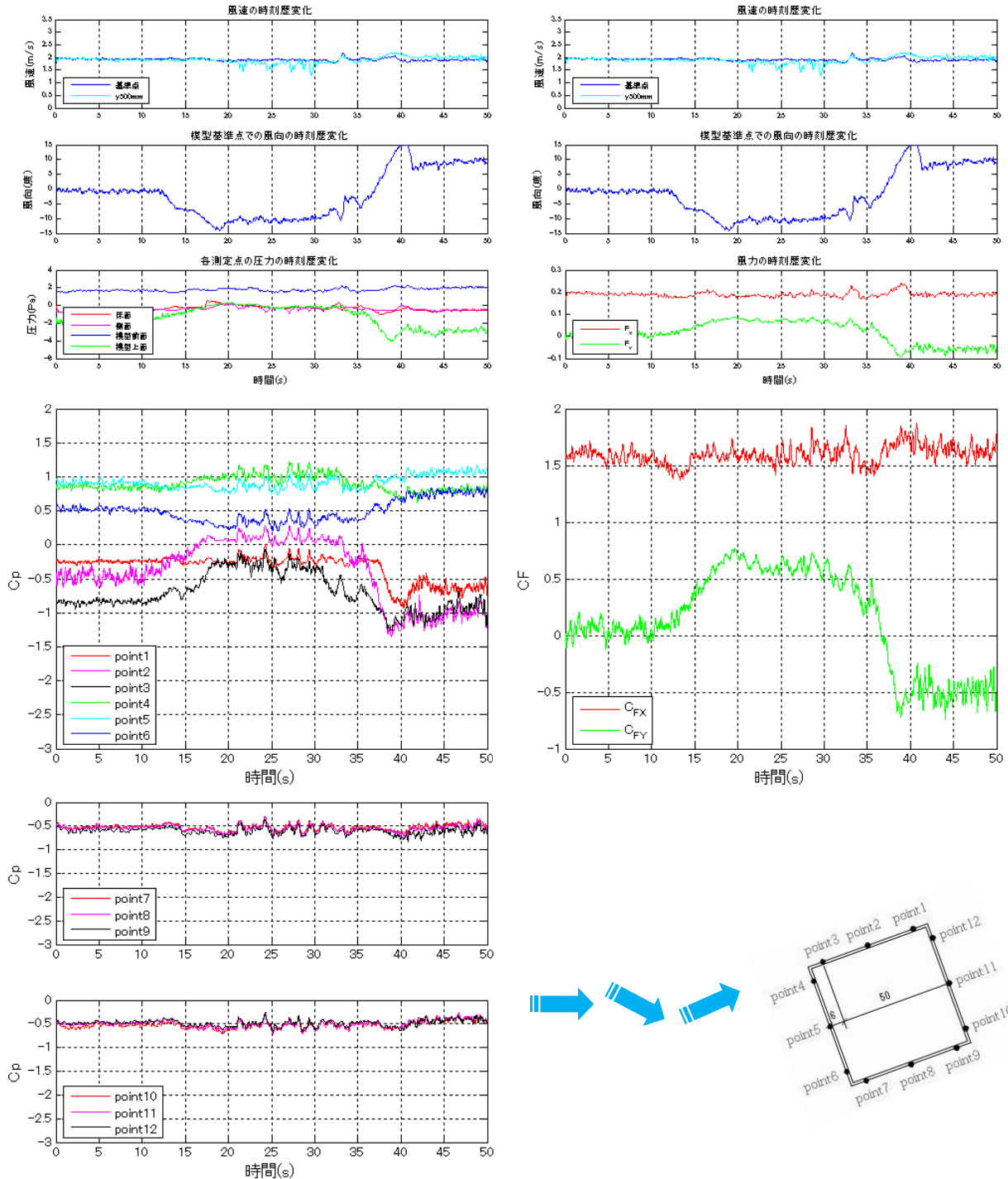


図 NDU10 の 10 秒変化時の模型角度 20° での時刻歴変化

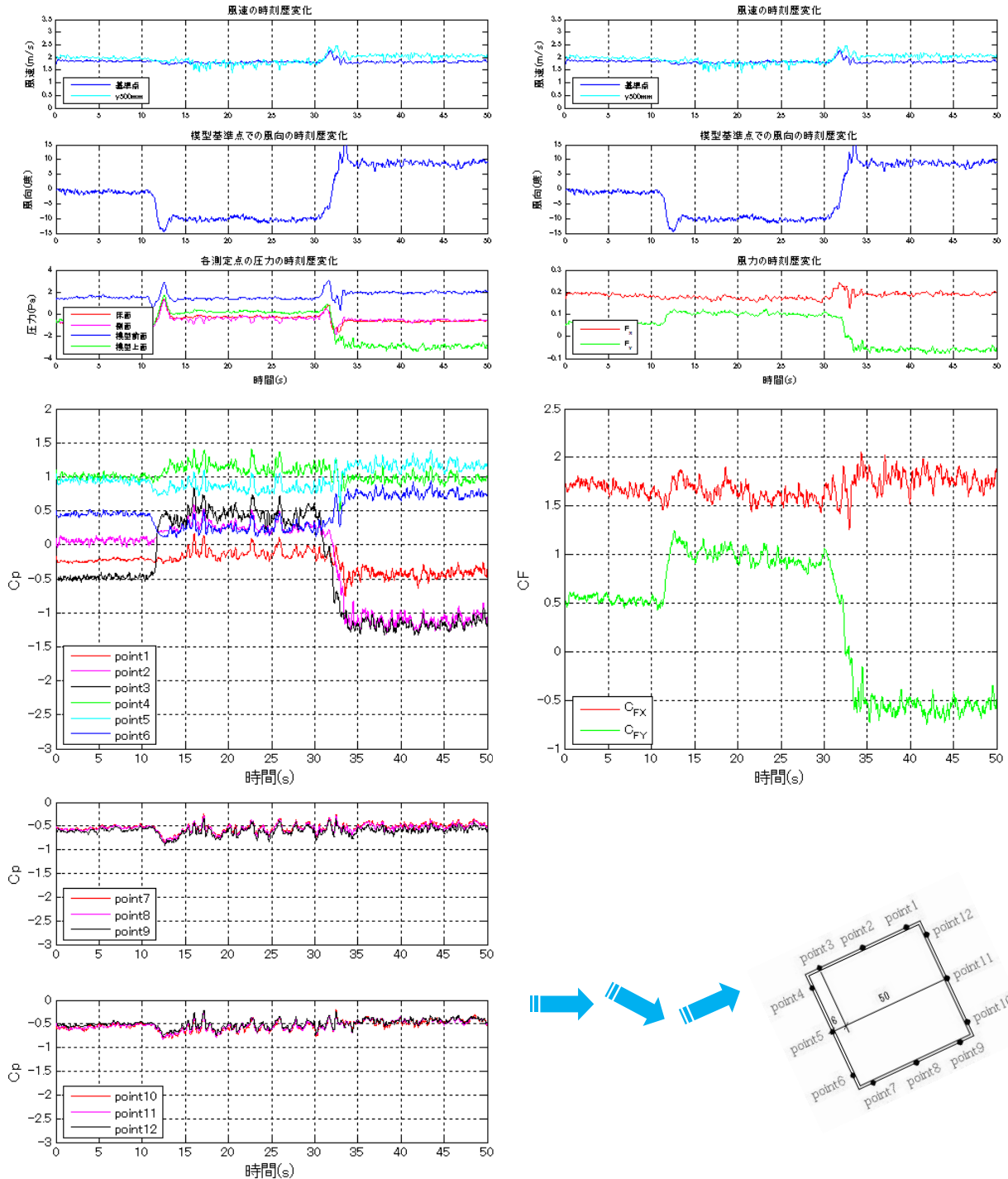


図 NDU10 の 2 秒変化時の模型角度 25° での時刻歴変化

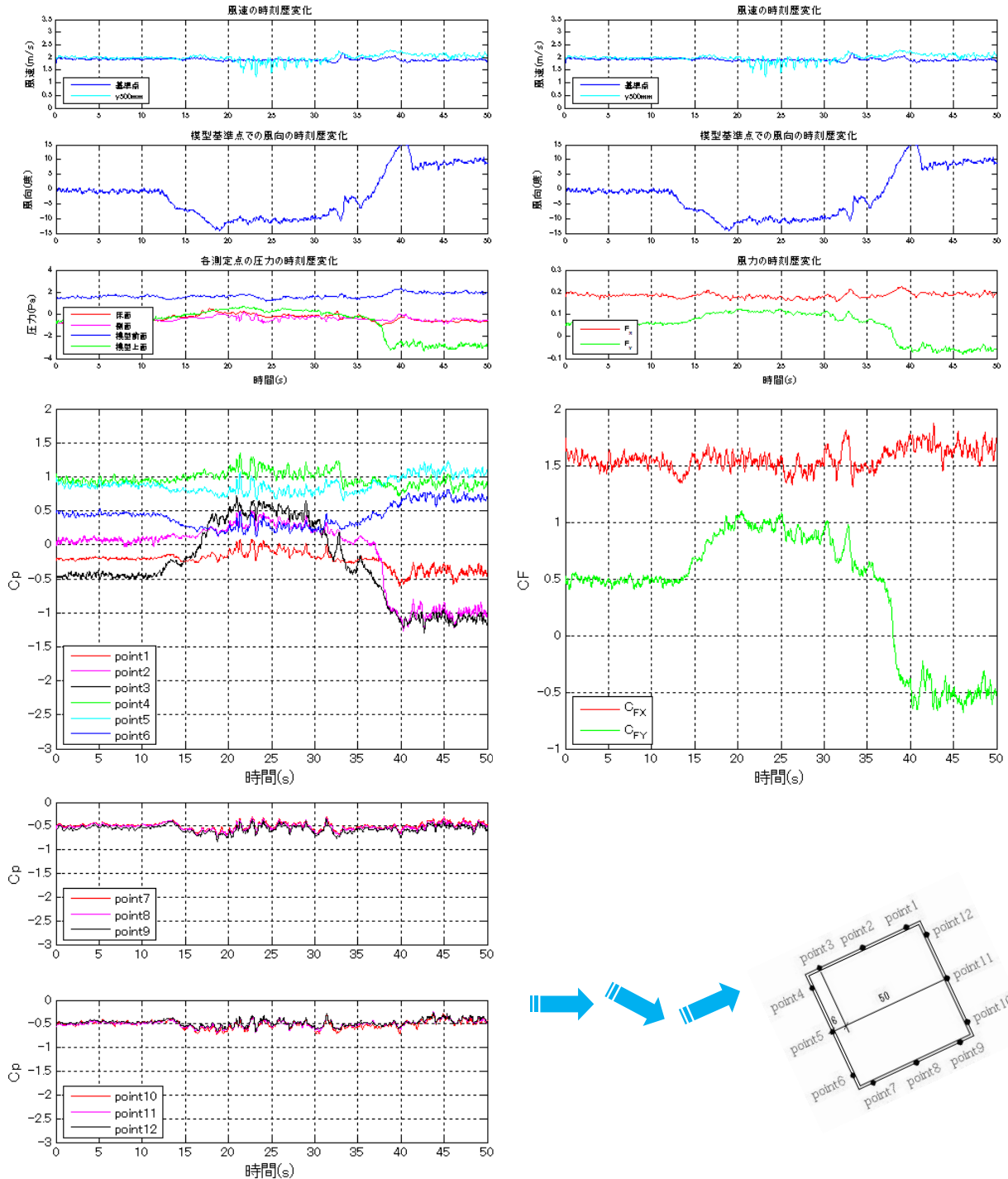


図 NDU10 の 10 秒変化時の模型角度 25° での時刻歴変化

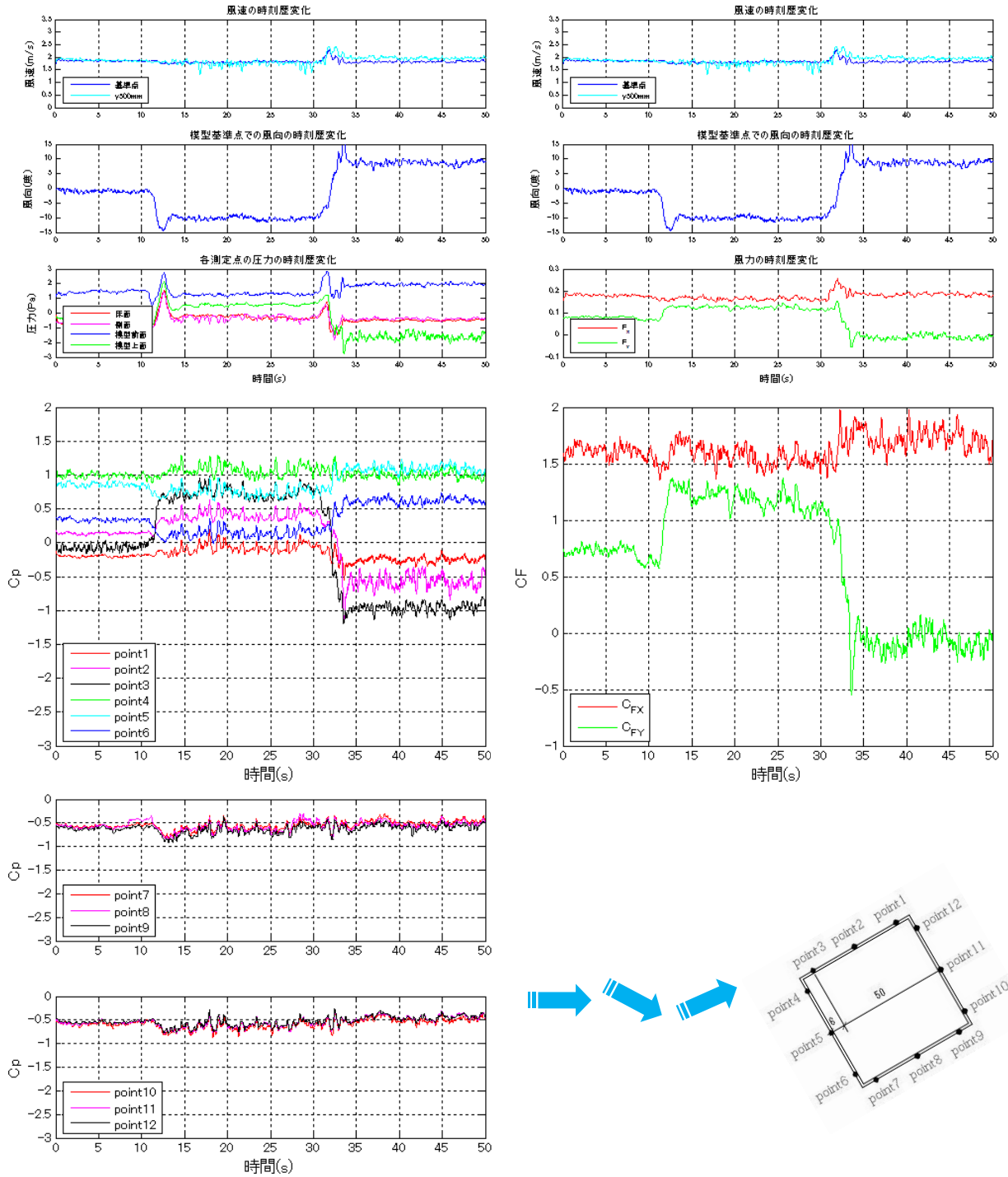


図 NDU10 の 2 秒変化時の模型角度 30° での時刻歴変化

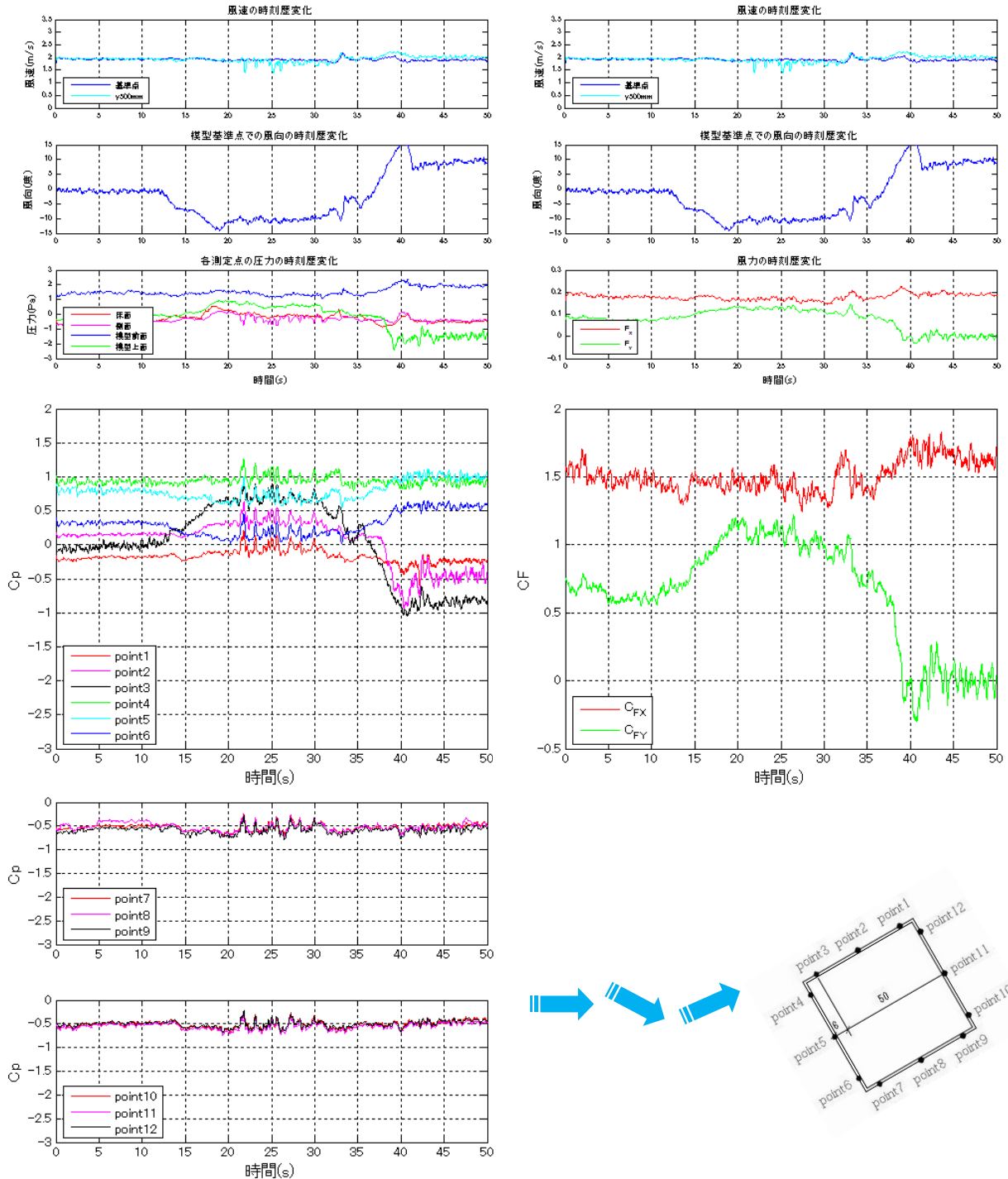


図 NDU10 の 10 秒変化時の模型角度 30° での時刻歴変化

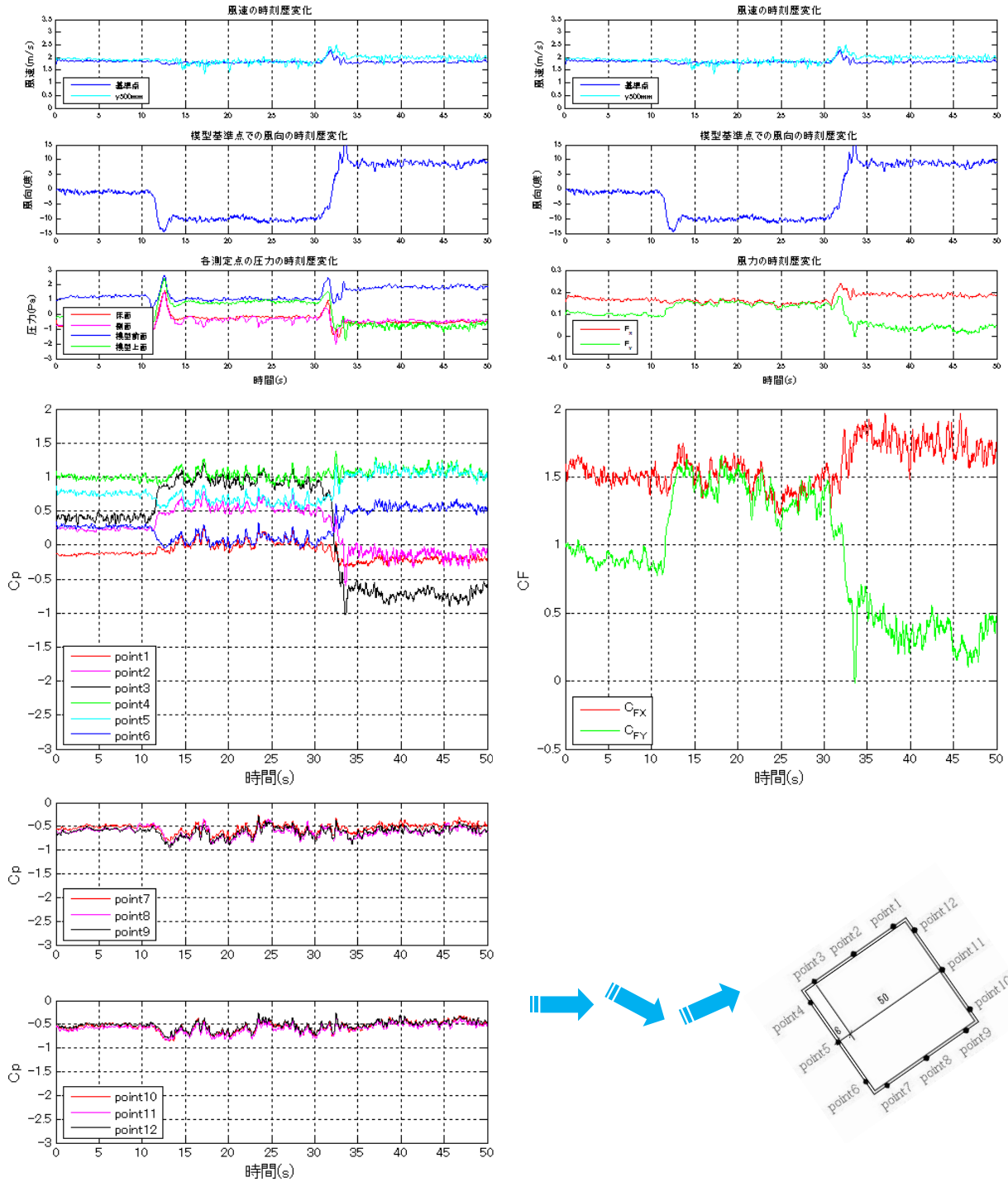


図 NDU10 の 2 秒変化時の模型角度 35° での時刻歴変化

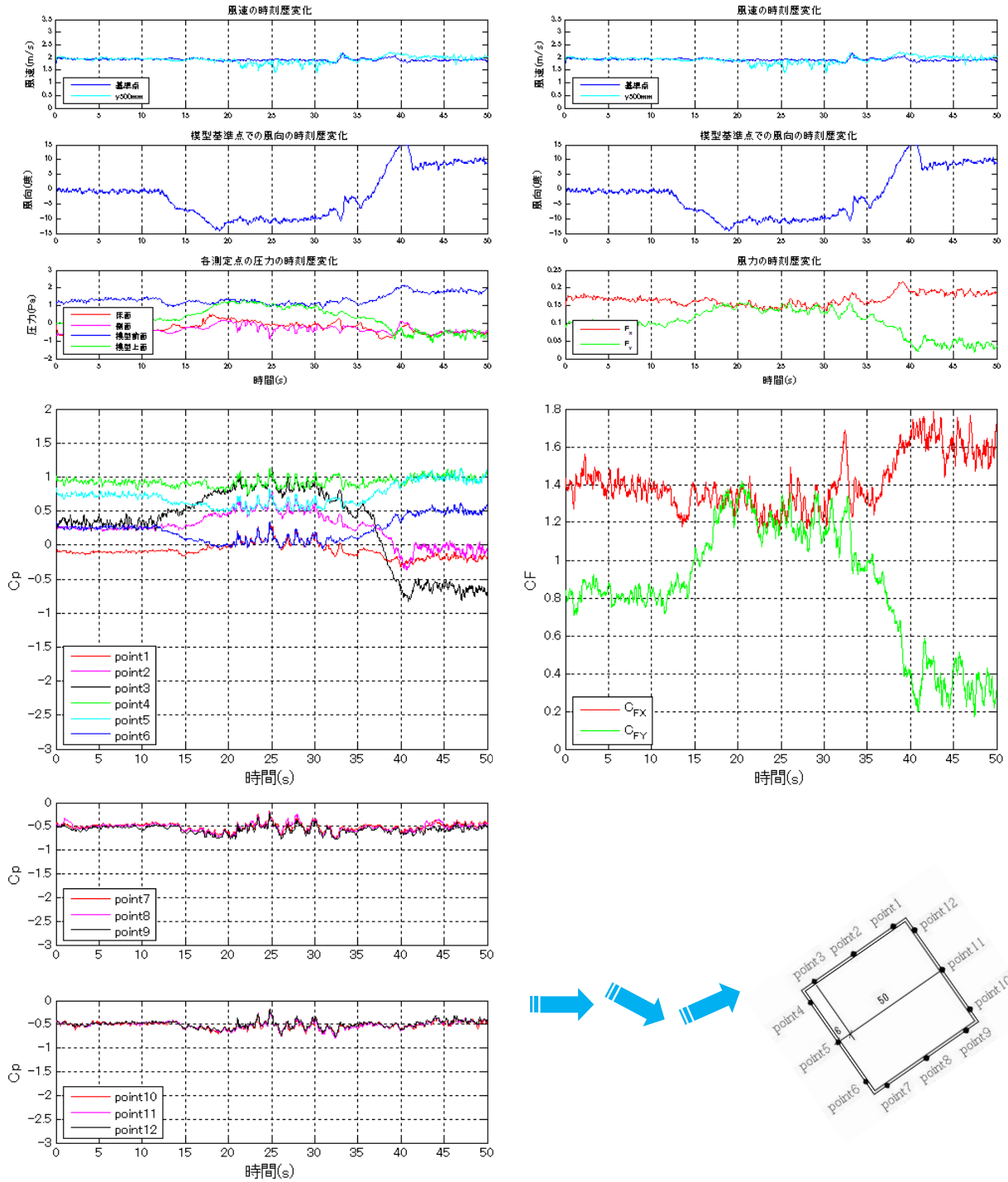


図 NDU10 の 10 秒変化時の模型角度 35° での時刻歴変化

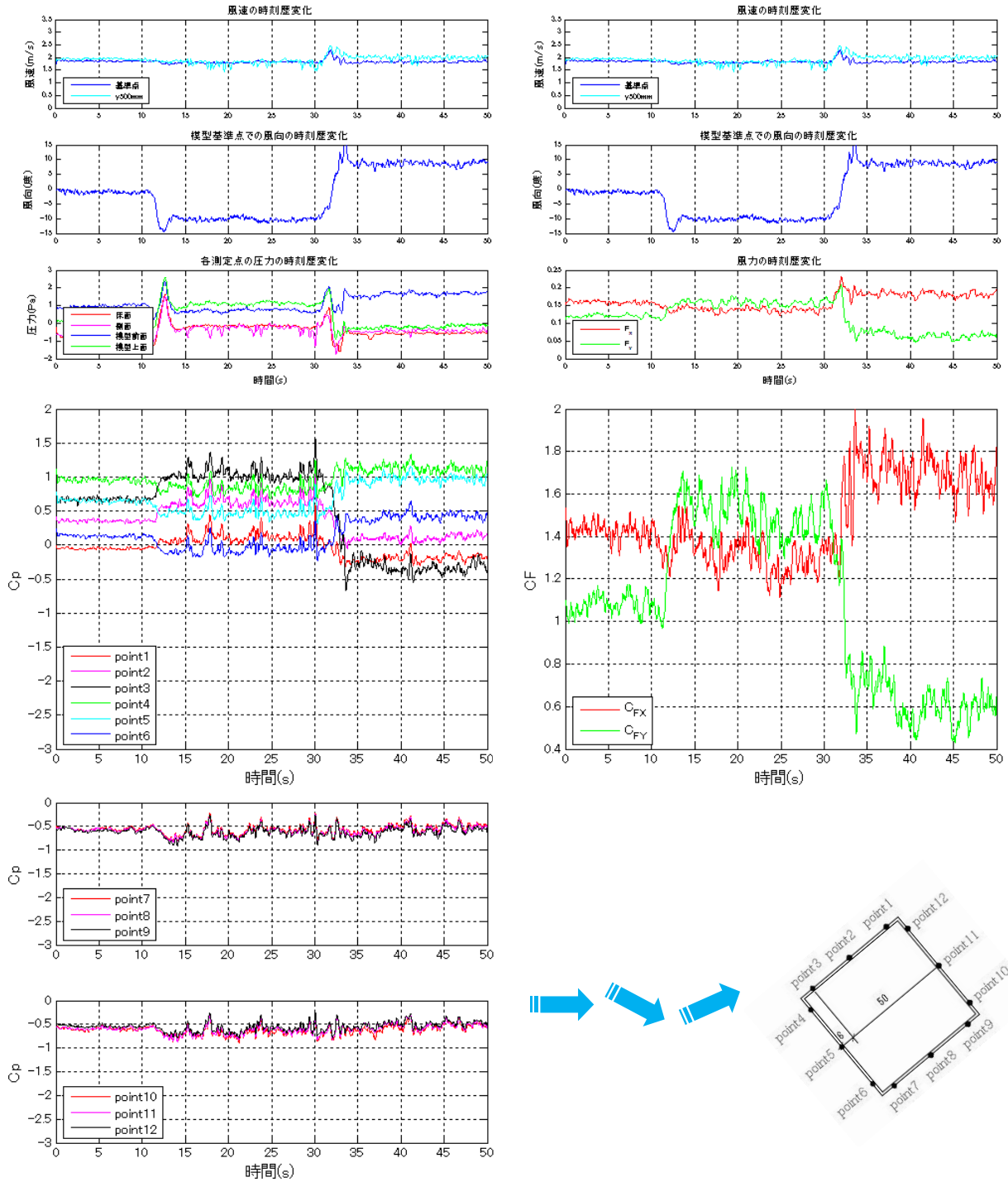


図 NDU10 の 2 秒変化時の模型角度 40° での時刻歴変化

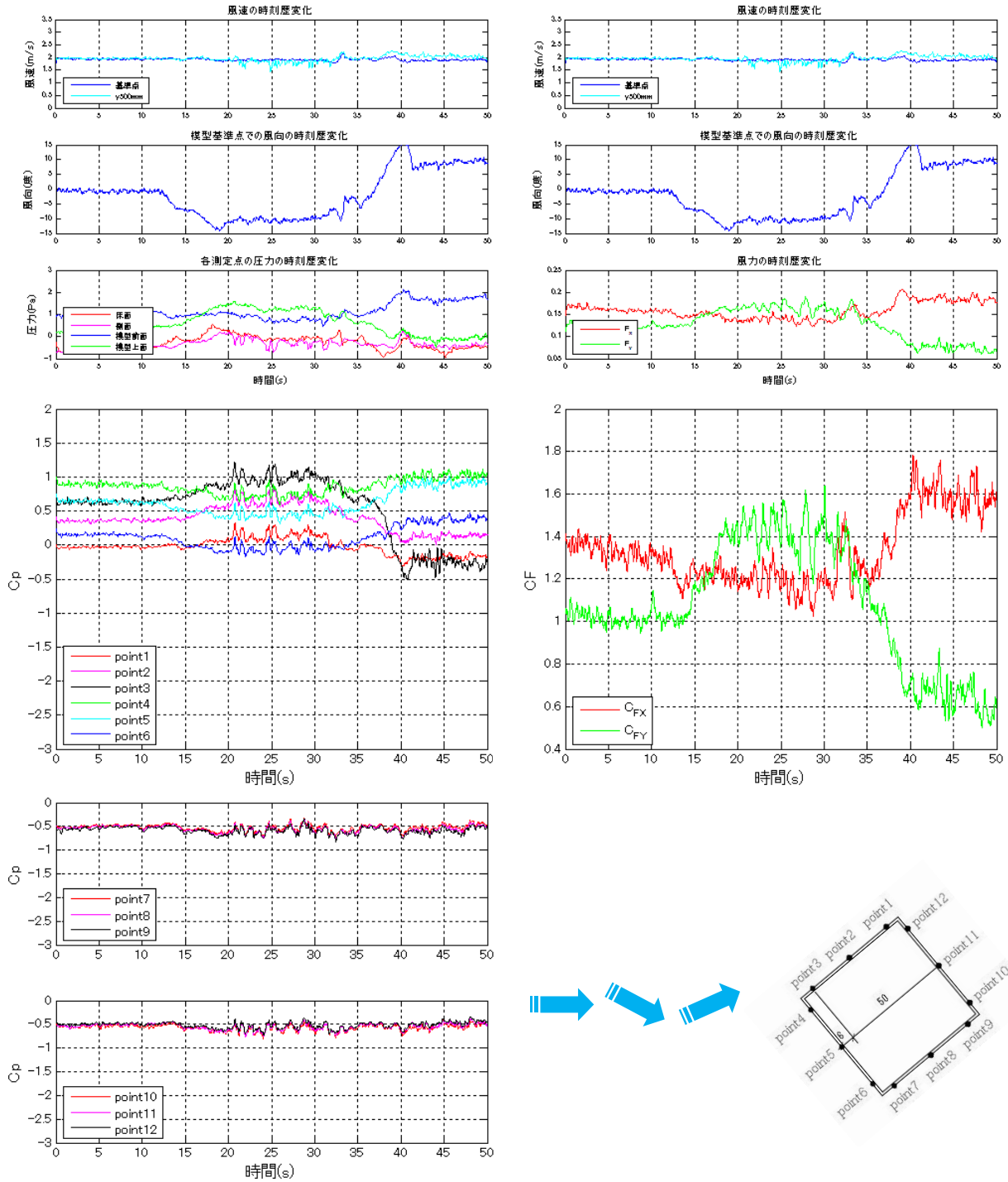


図 NDU10 の 10 秒変化時の模型角度 40° での時刻歴変化

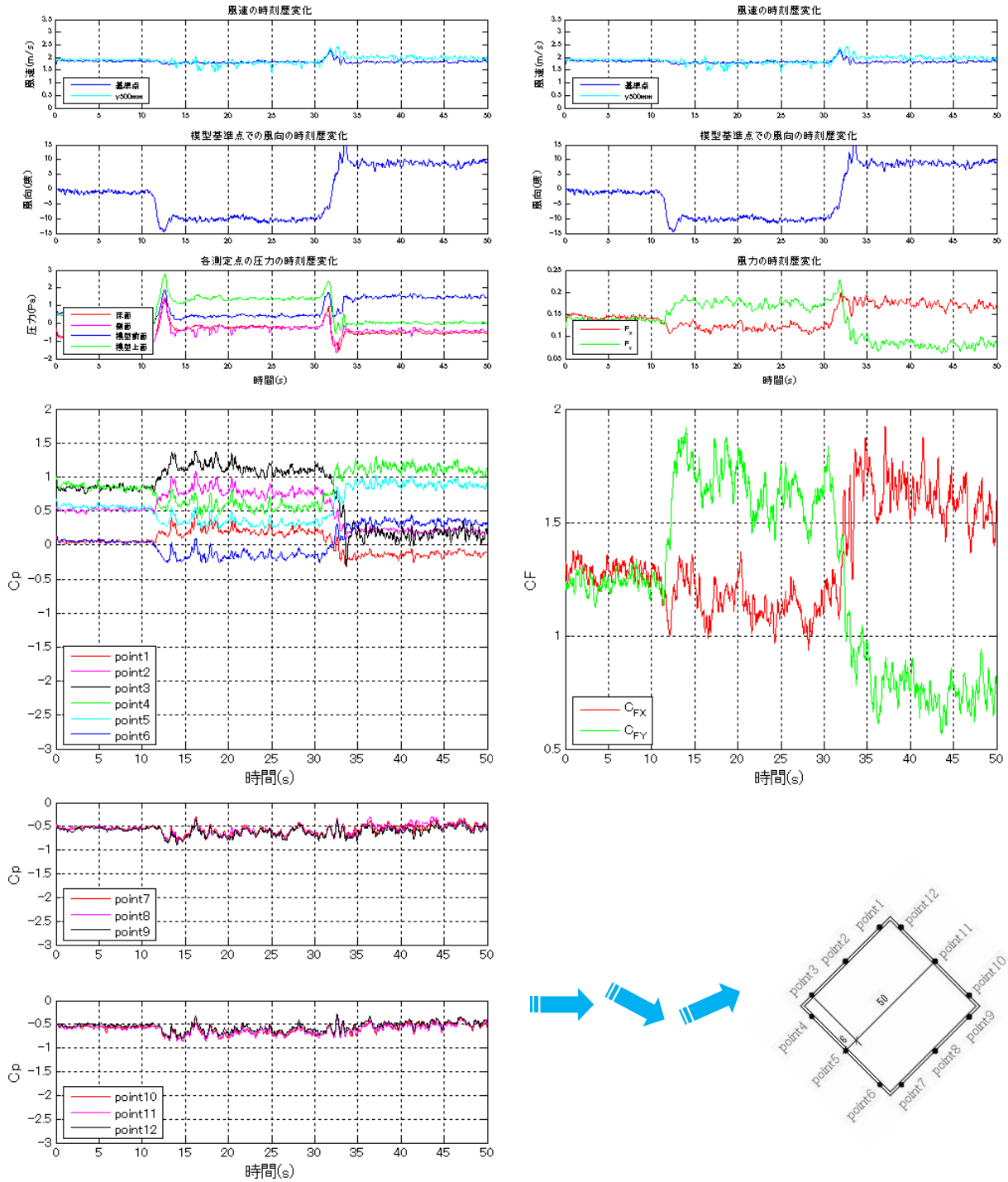


図 NDU10 の 2 秒変化時の模型角度 45° での時刻歴変化

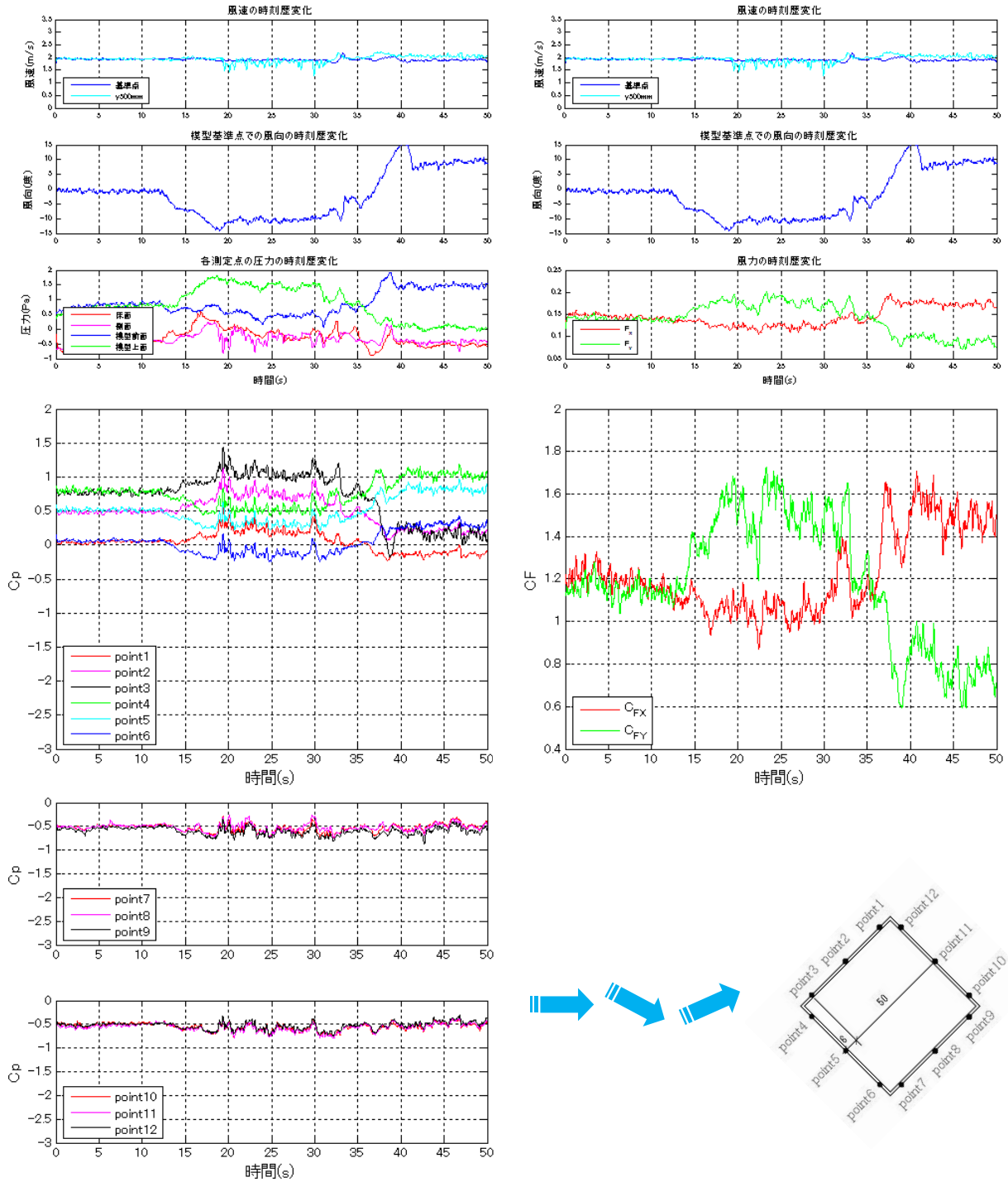


図 NDU10 の 10 秒変化時の模型角度 45° での時刻歴変化

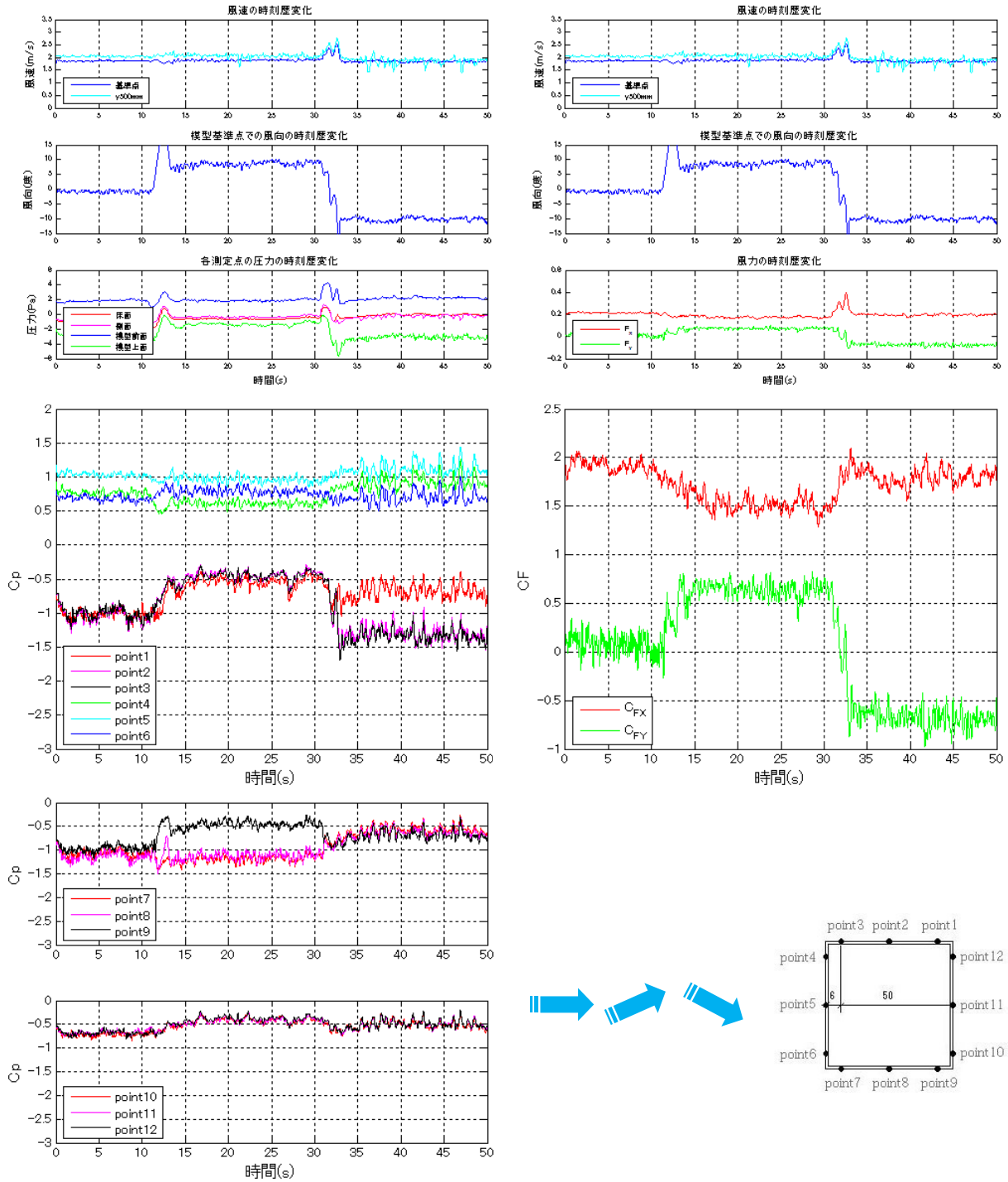


図 NUD10 の 2 秒変化時の模型角度 0° での時刻歴変化

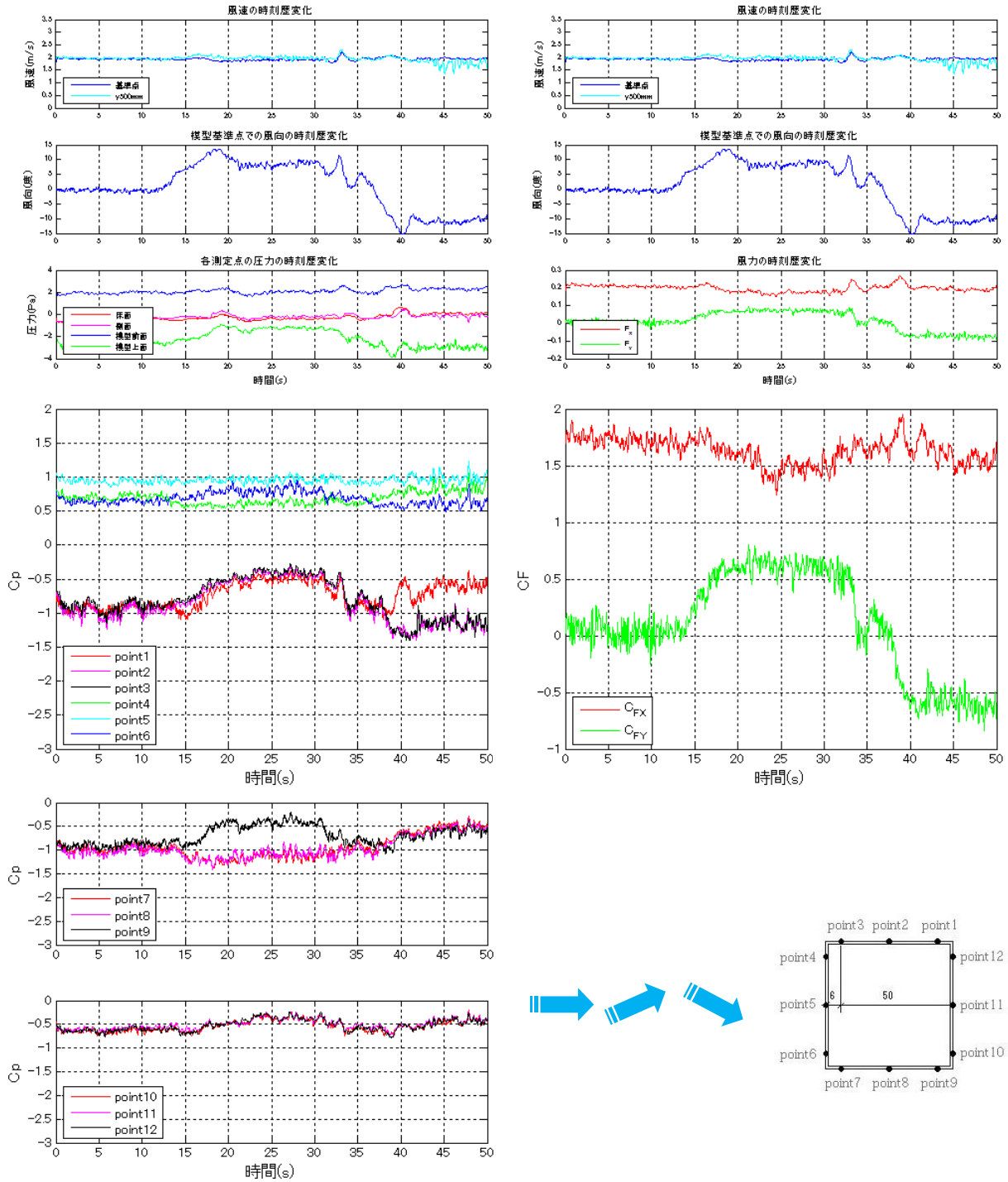


図 NUD10 の 10 秒変化時の模型角度 0° での時刻歴変化

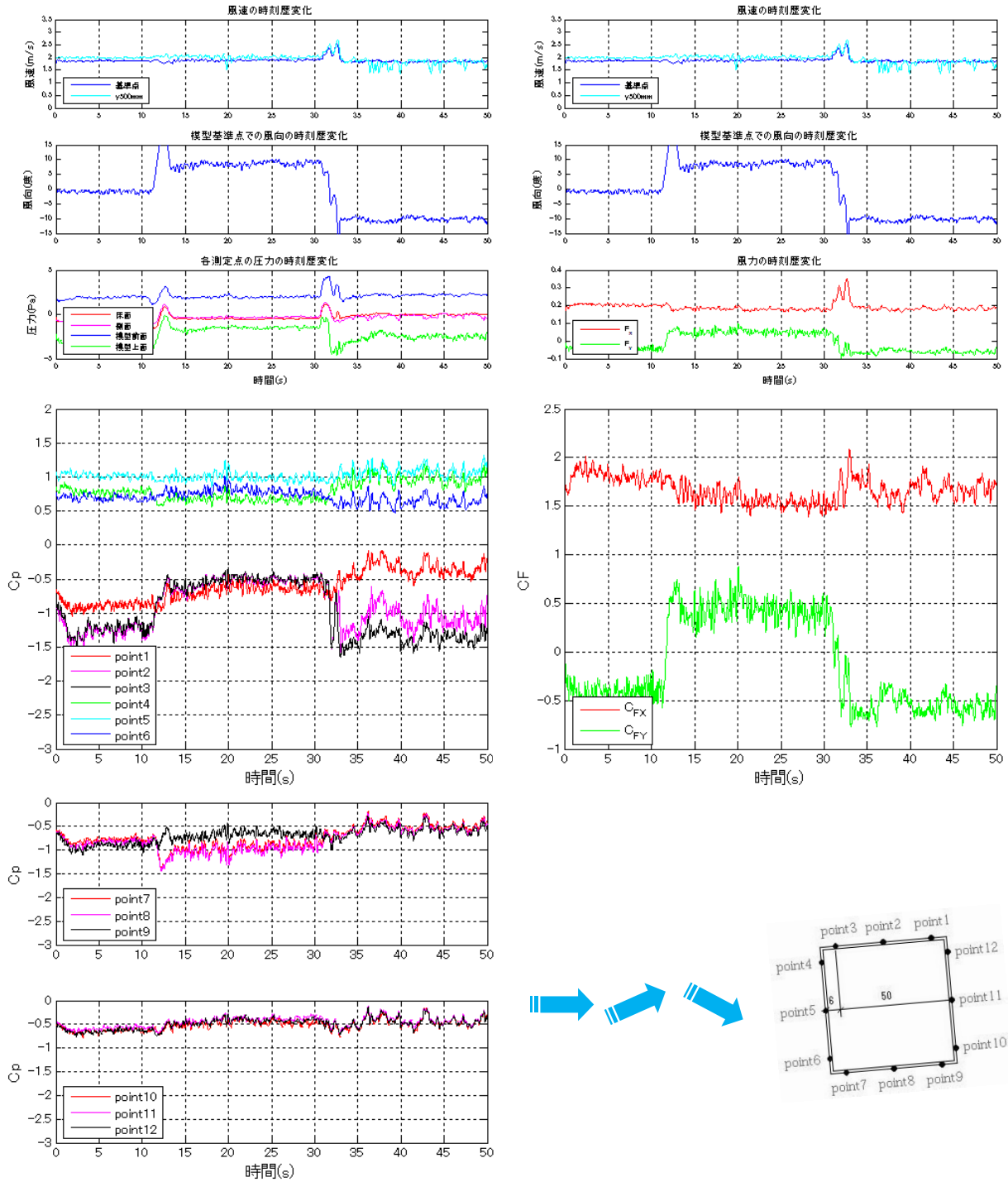


図 NUD10 の 2 秒変化時の模型角度 5° での時刻歴変化

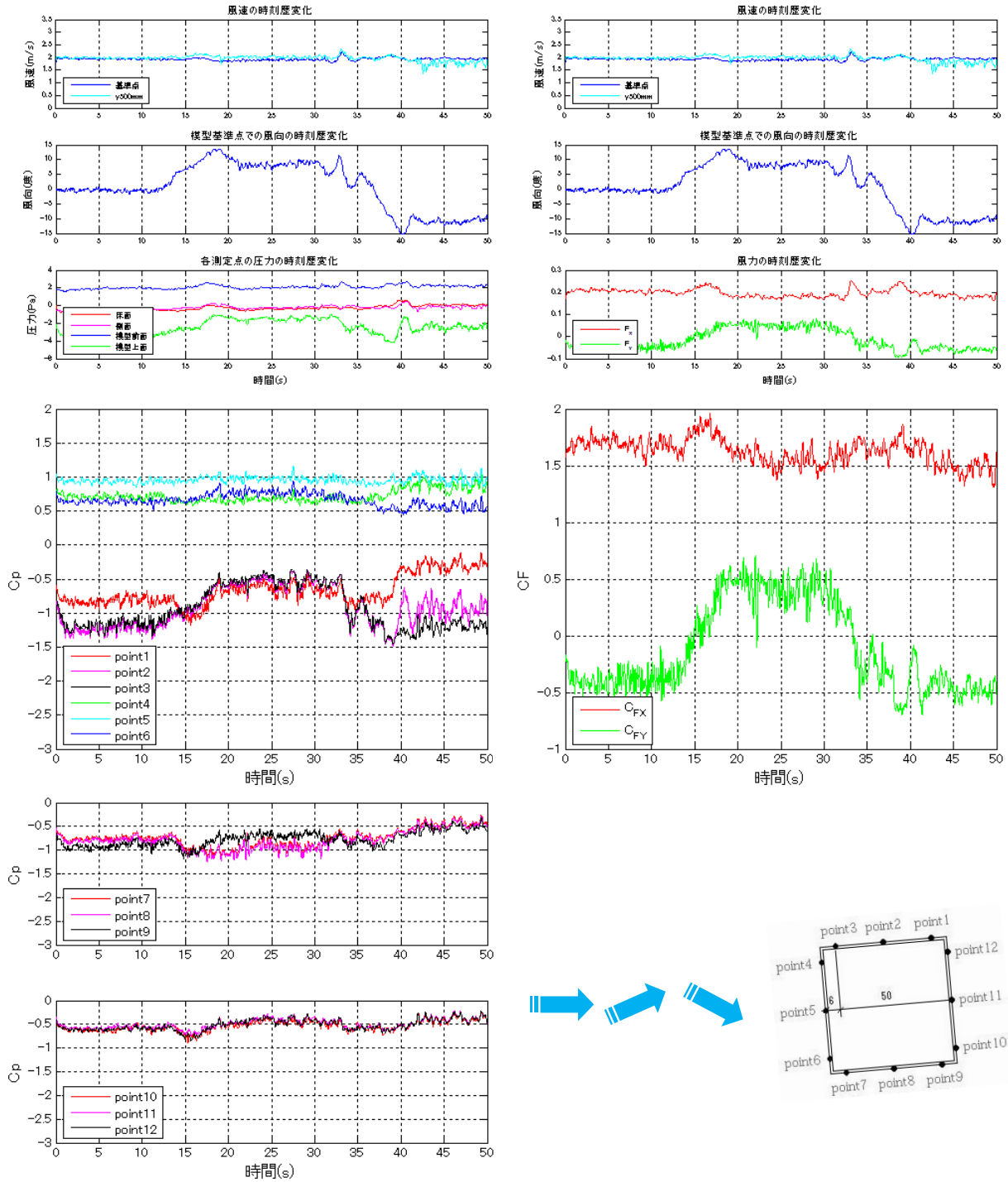


図 NUD10 の 10 秒変化時の模型角度 5° での時刻歴変化

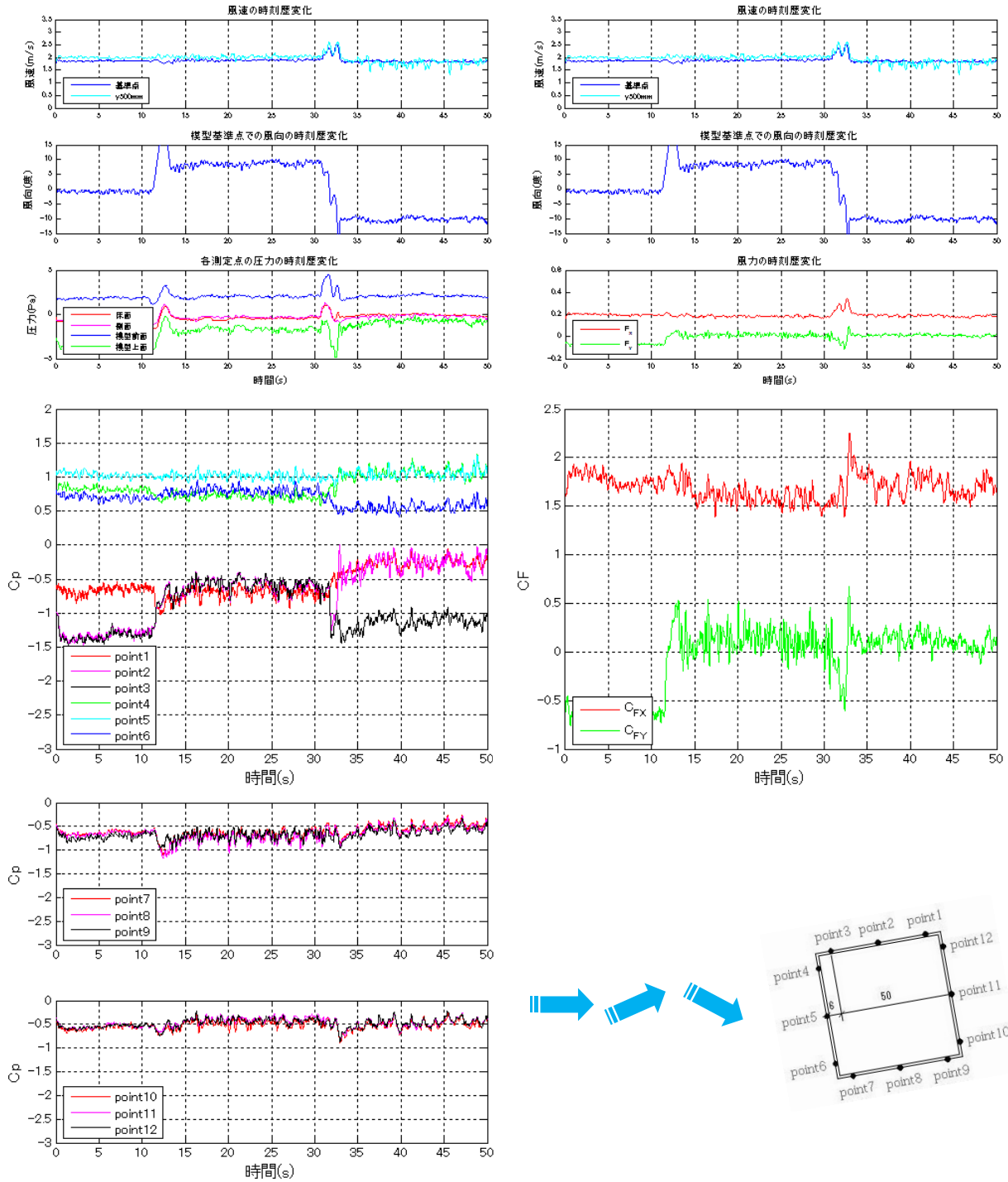


図 NUD10 の 2 秒変化時の模型角度 10° での時刻歴変化

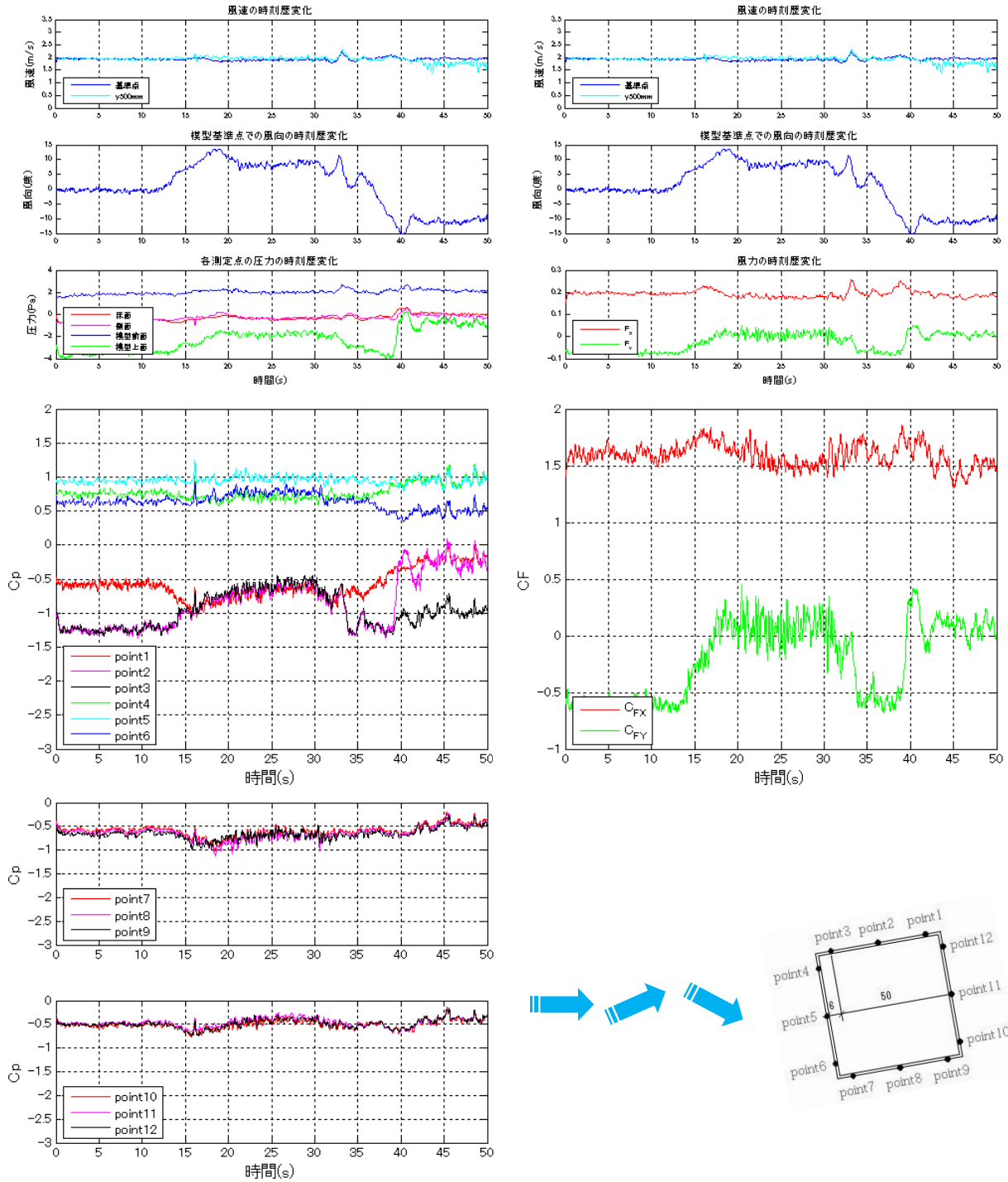


図 NUD10 の 10 秒変化時の模型角度 10° での時刻歴変化

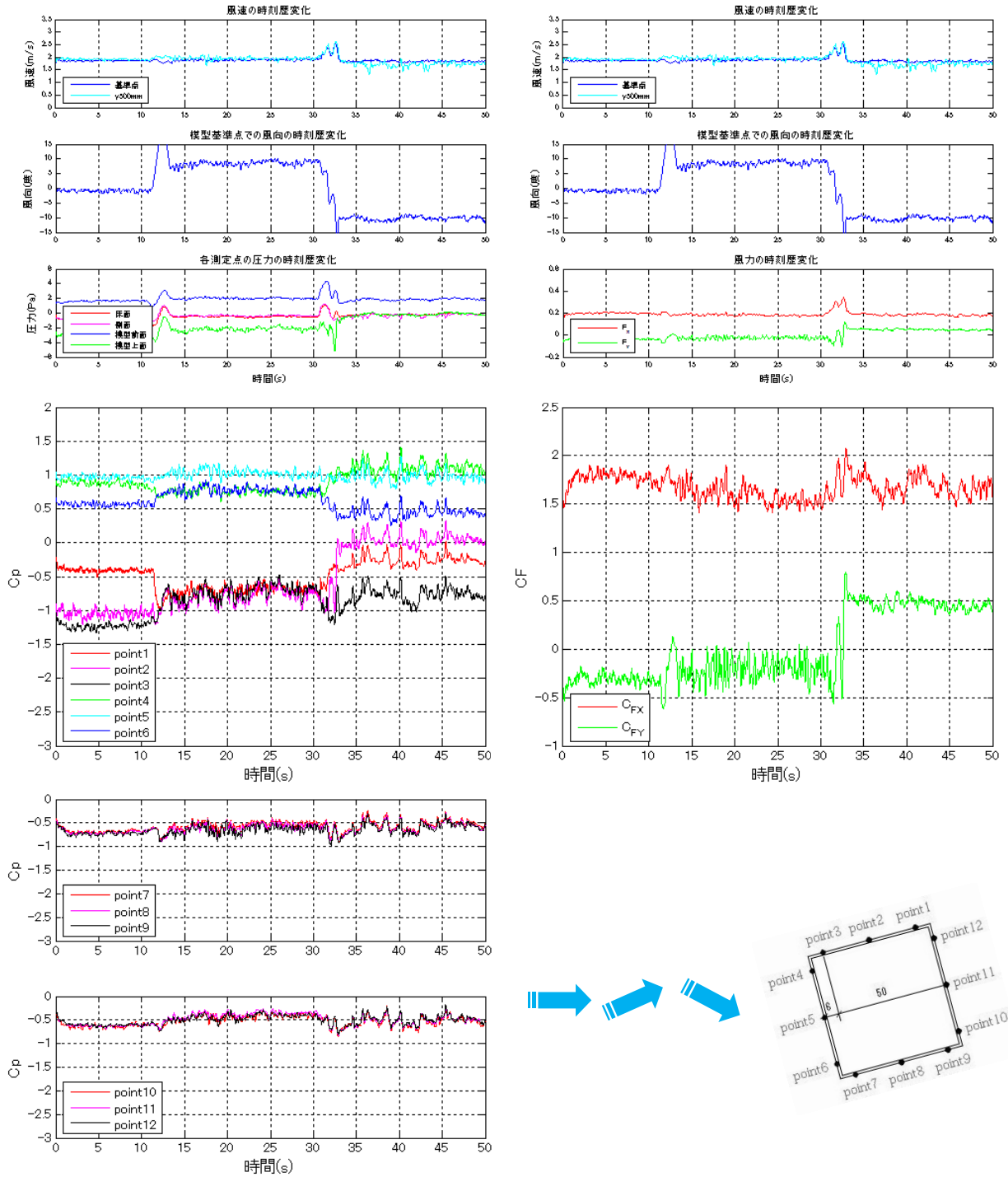


図 NUD10 の 2 秒変化時の模型角度 15° での時刻歴変化

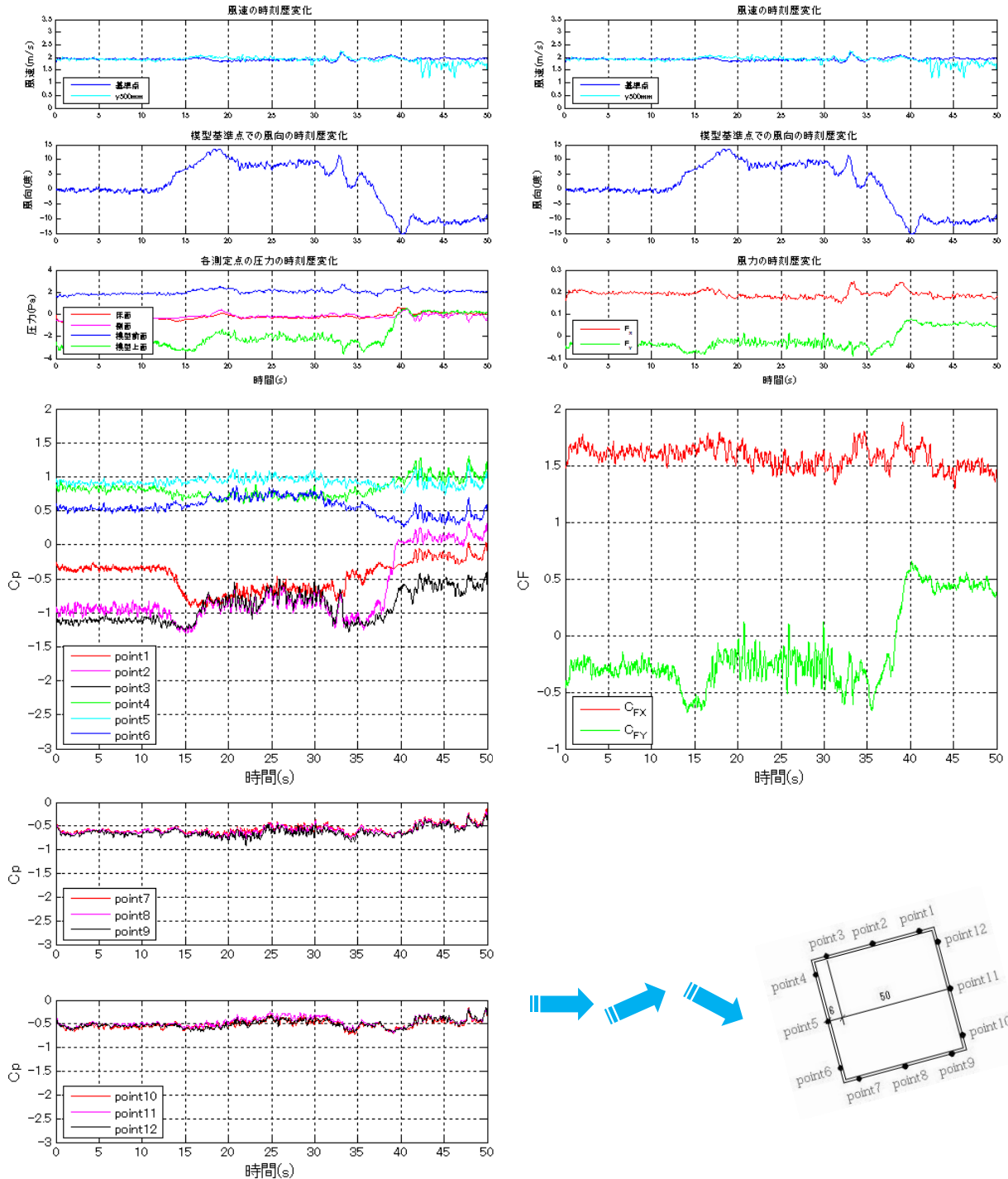


図 NUD10 の 10 秒変化時の模型角度 15° での時刻歴変化

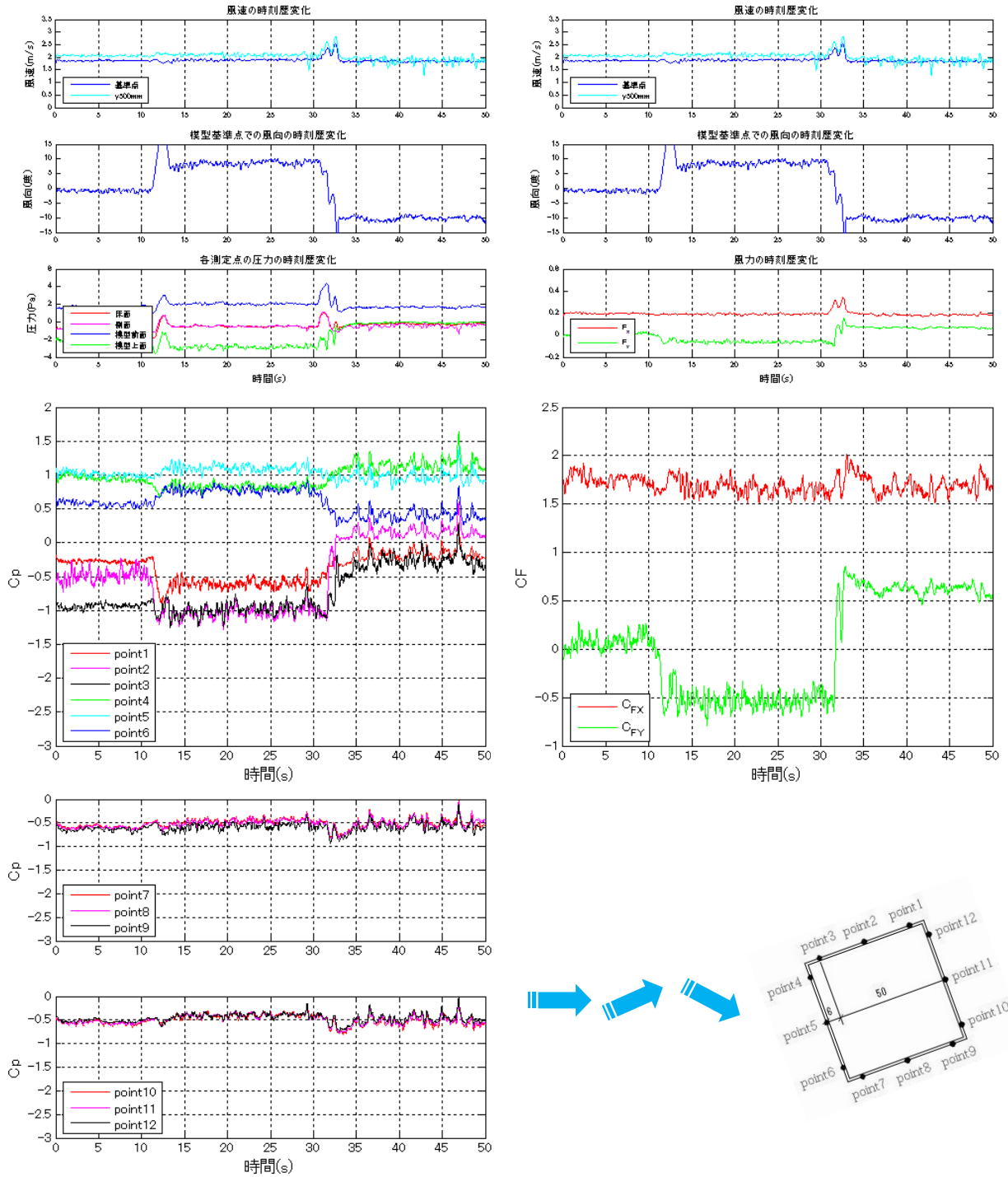


図 NUD10 の 2 秒変化時の模型角度 20° での時刻歴変化

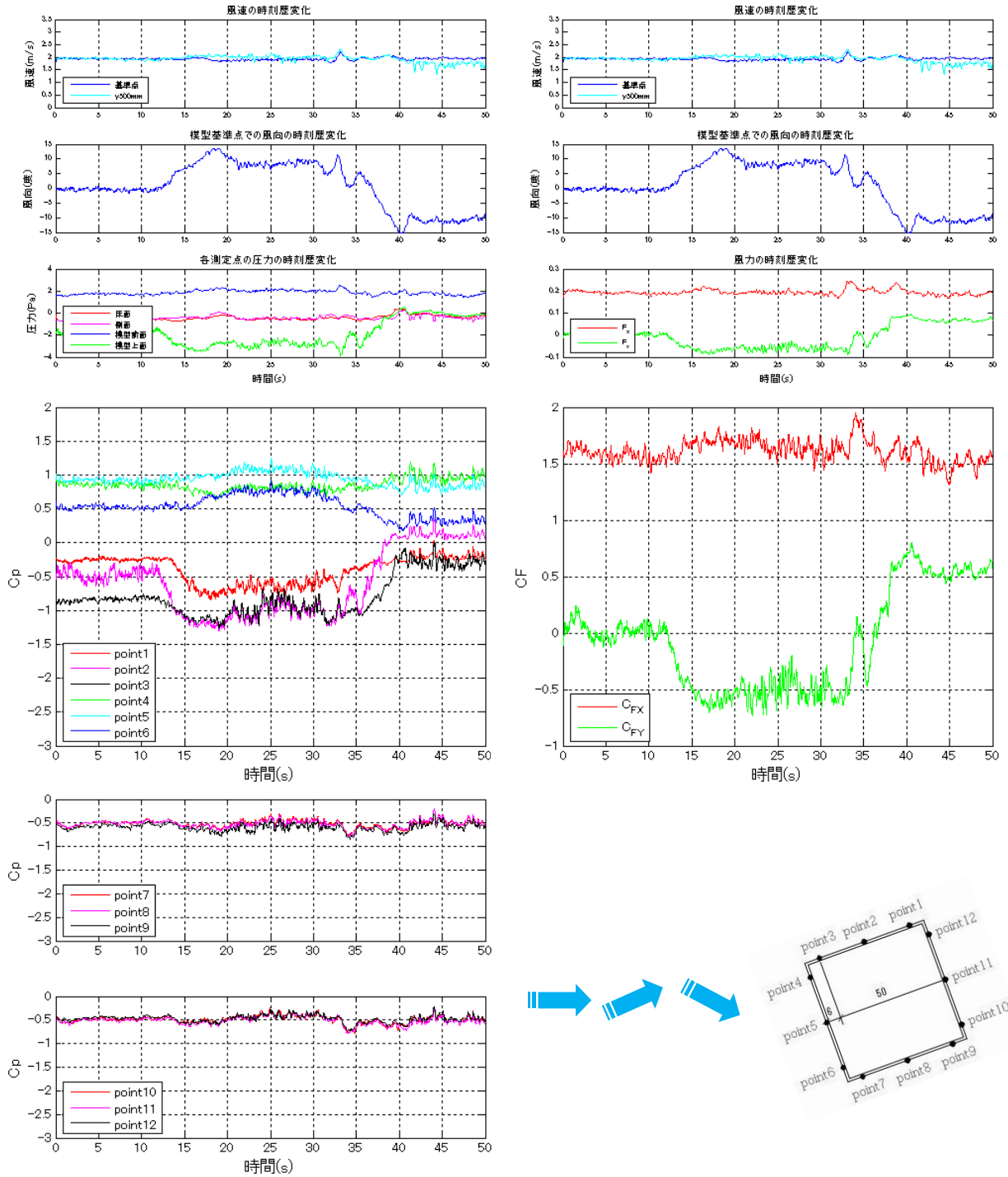


図 NUD10 の 10 秒変化時の模型角度 20° での時刻歴変化

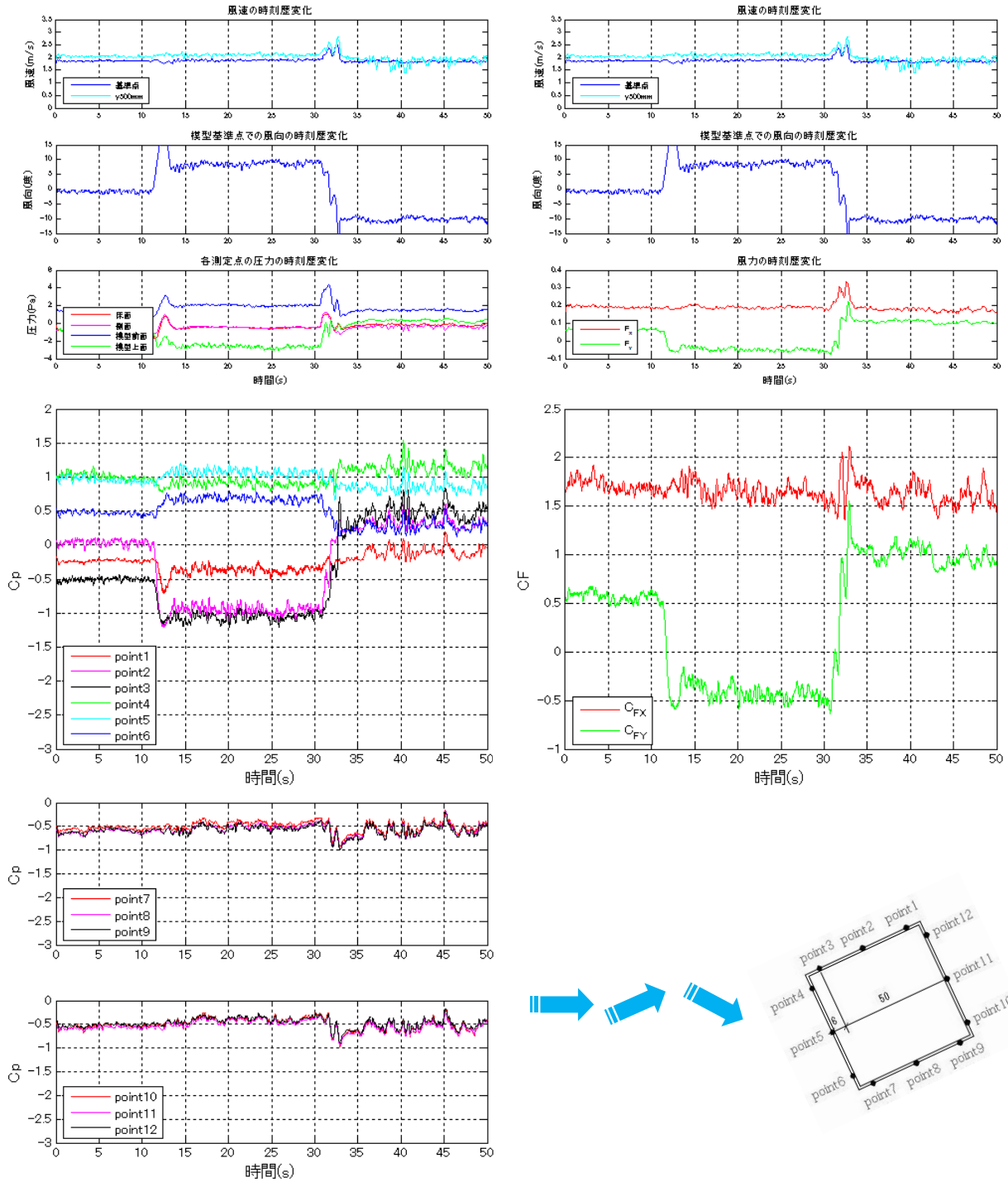


図 NUD10 の 2 秒変化時の模型角度 25° での時刻歴変化

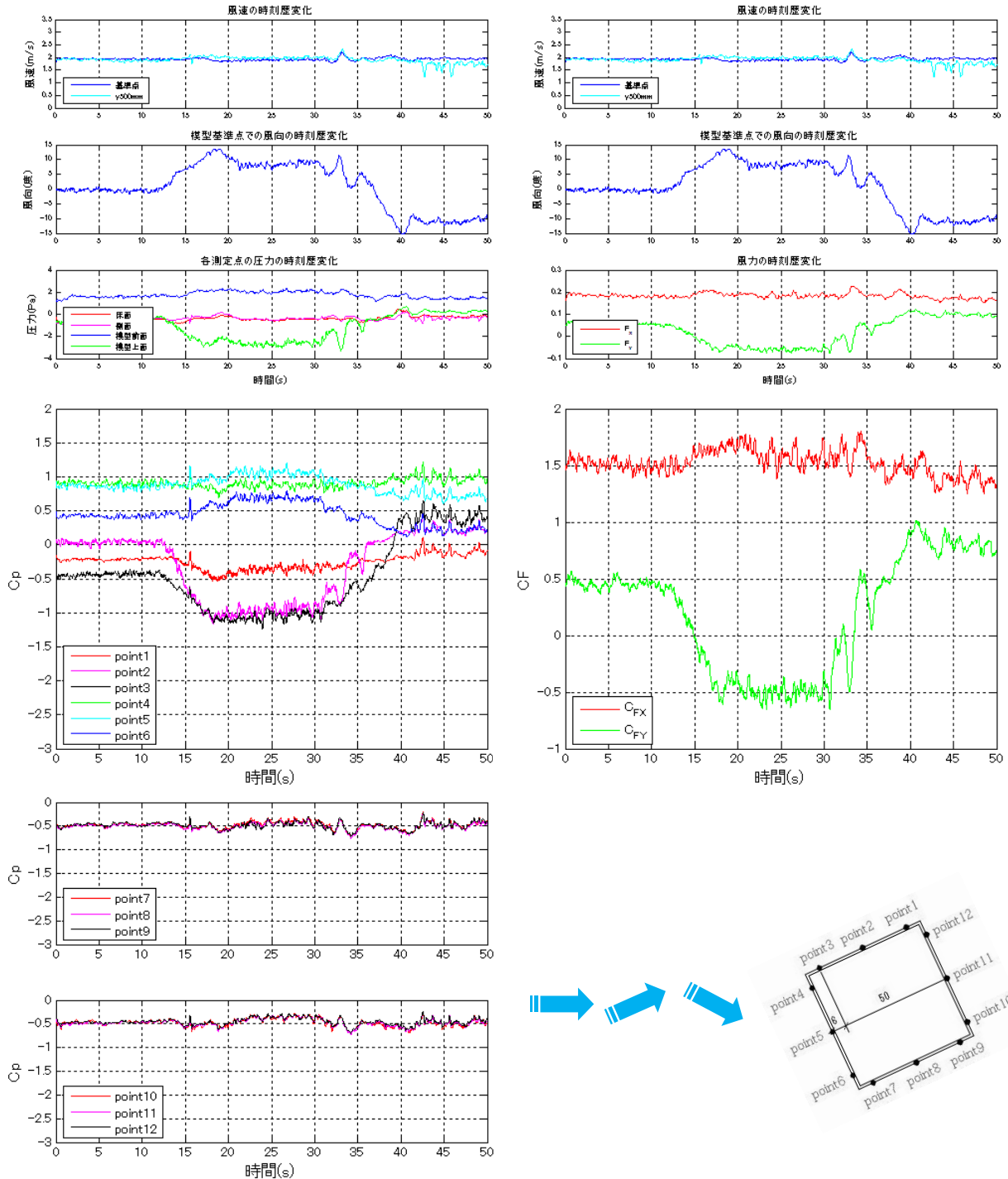


図 NUD10 の 10 秒変化時の模型角度 25° での時刻歴変化

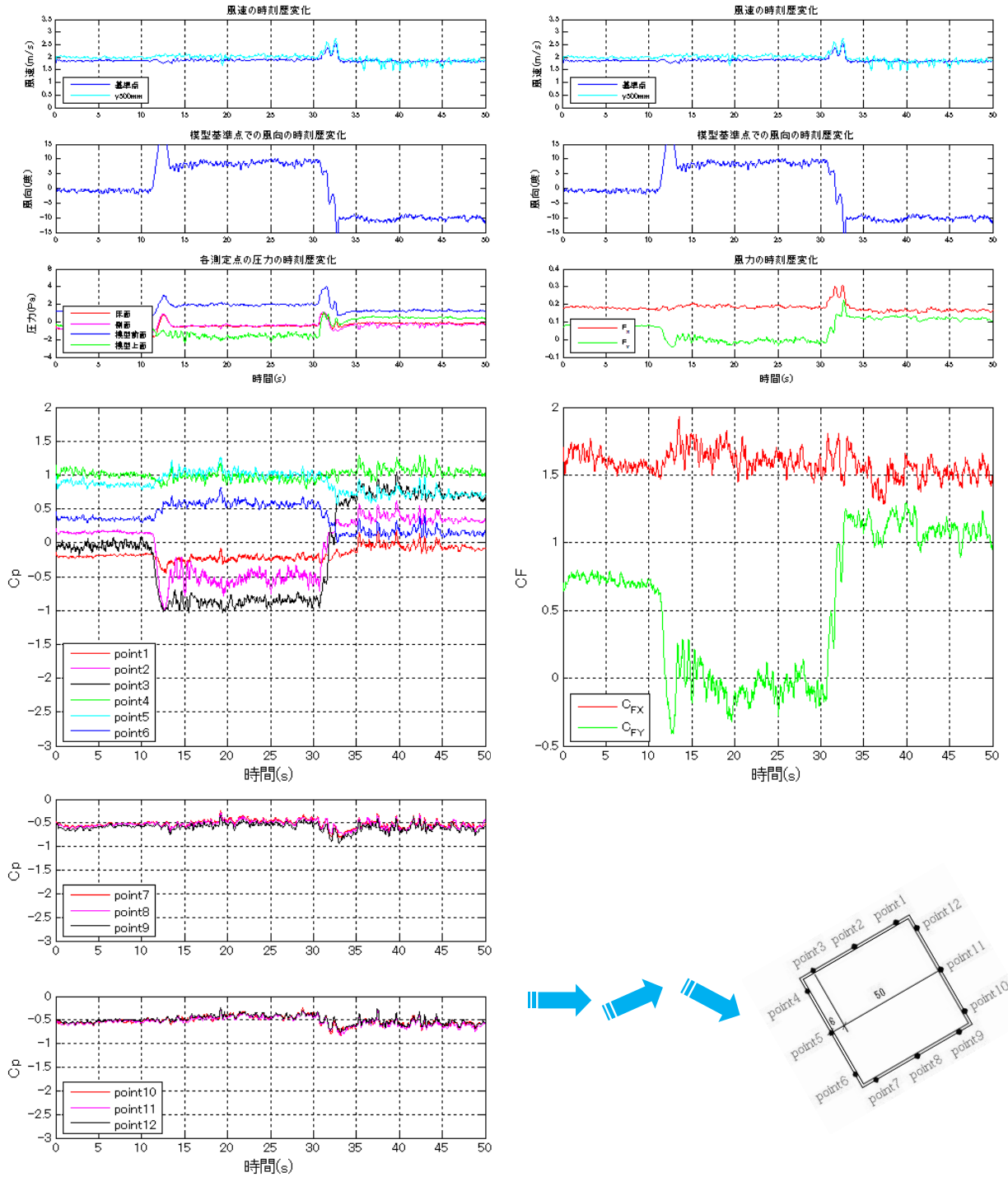


図 NUD10 の 2 秒変化時の模型角度 30° での時刻歴変化

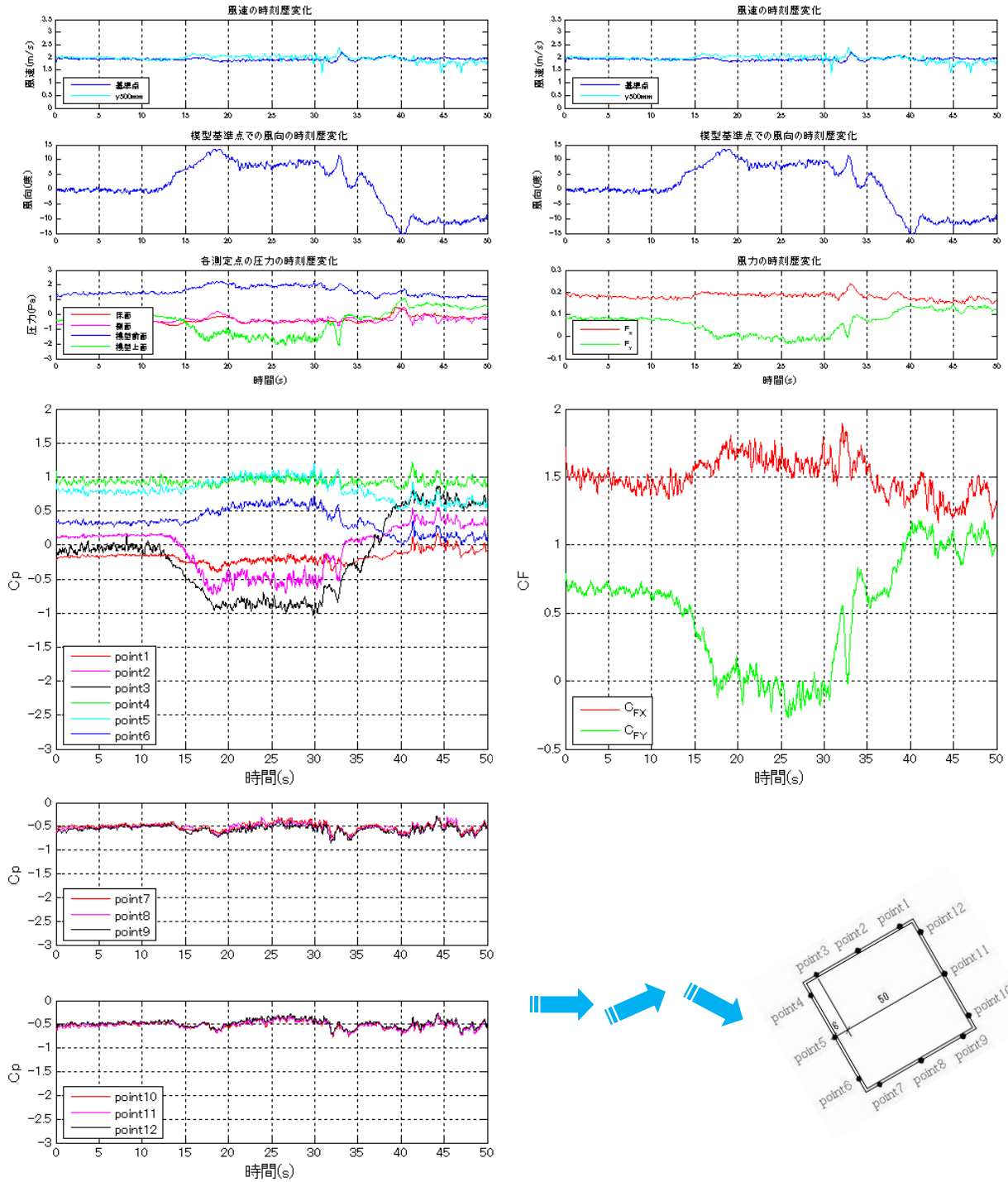


図 NUD10 の 10 秒変化時の模型角度 30° での時刻歴変化

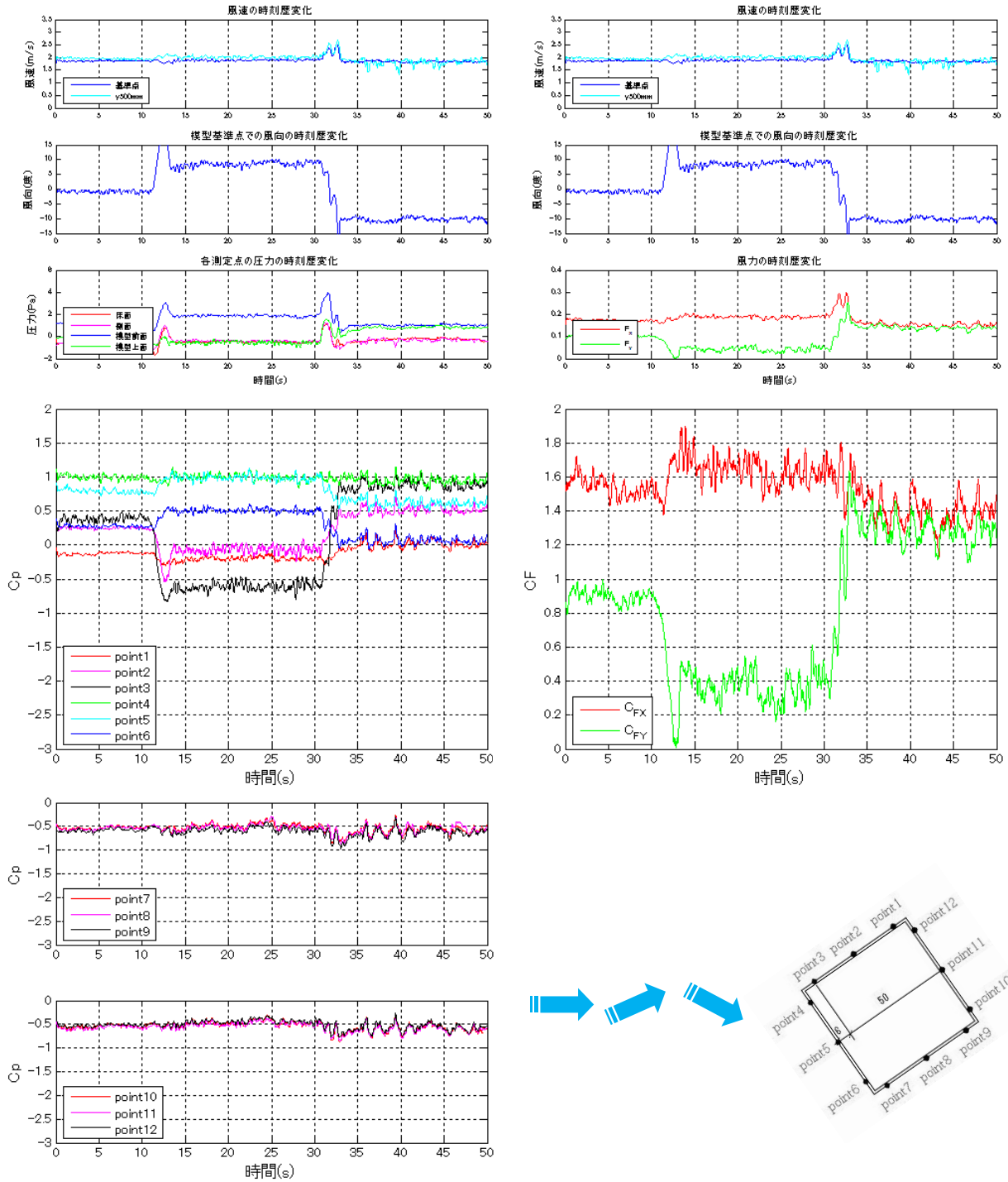


図 NUD10 の 2 秒変化時の模型角度 35° での時刻歴変化

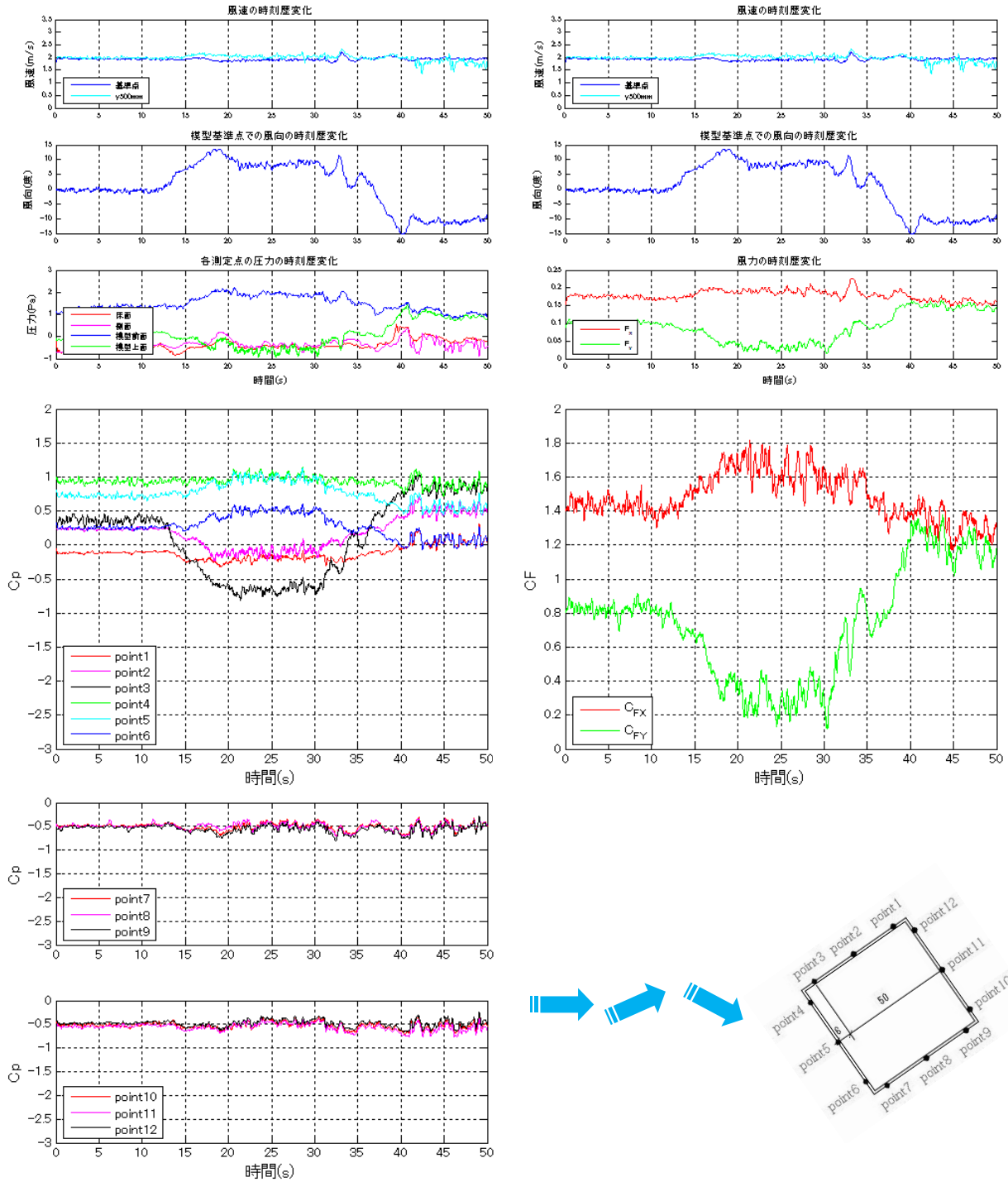


図 NUD10 の 10 秒変化時の模型角度 35° での時刻歴変化

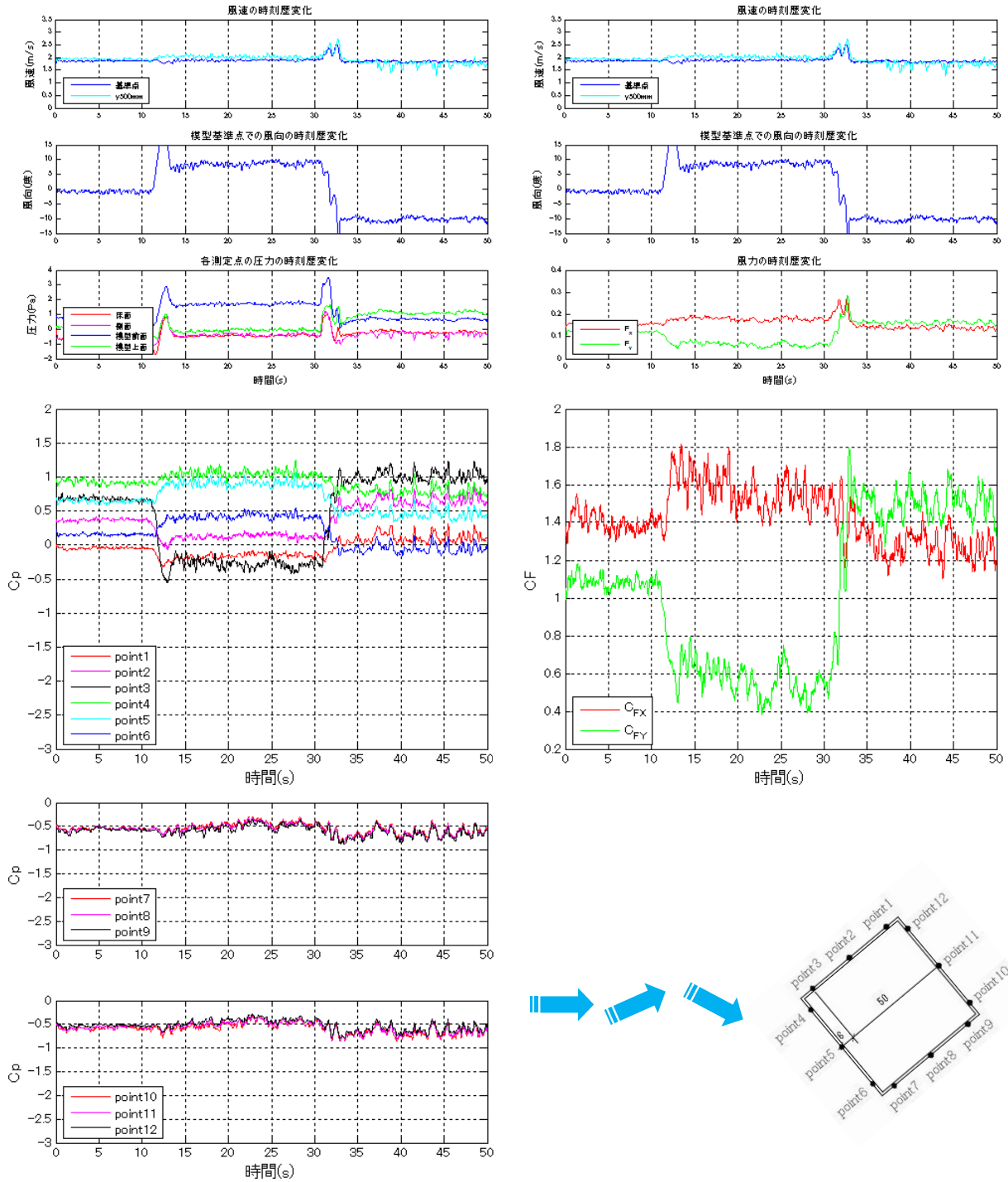


図 NUD10 の 2 秒変化時の模型角度 40° での時刻歴変化

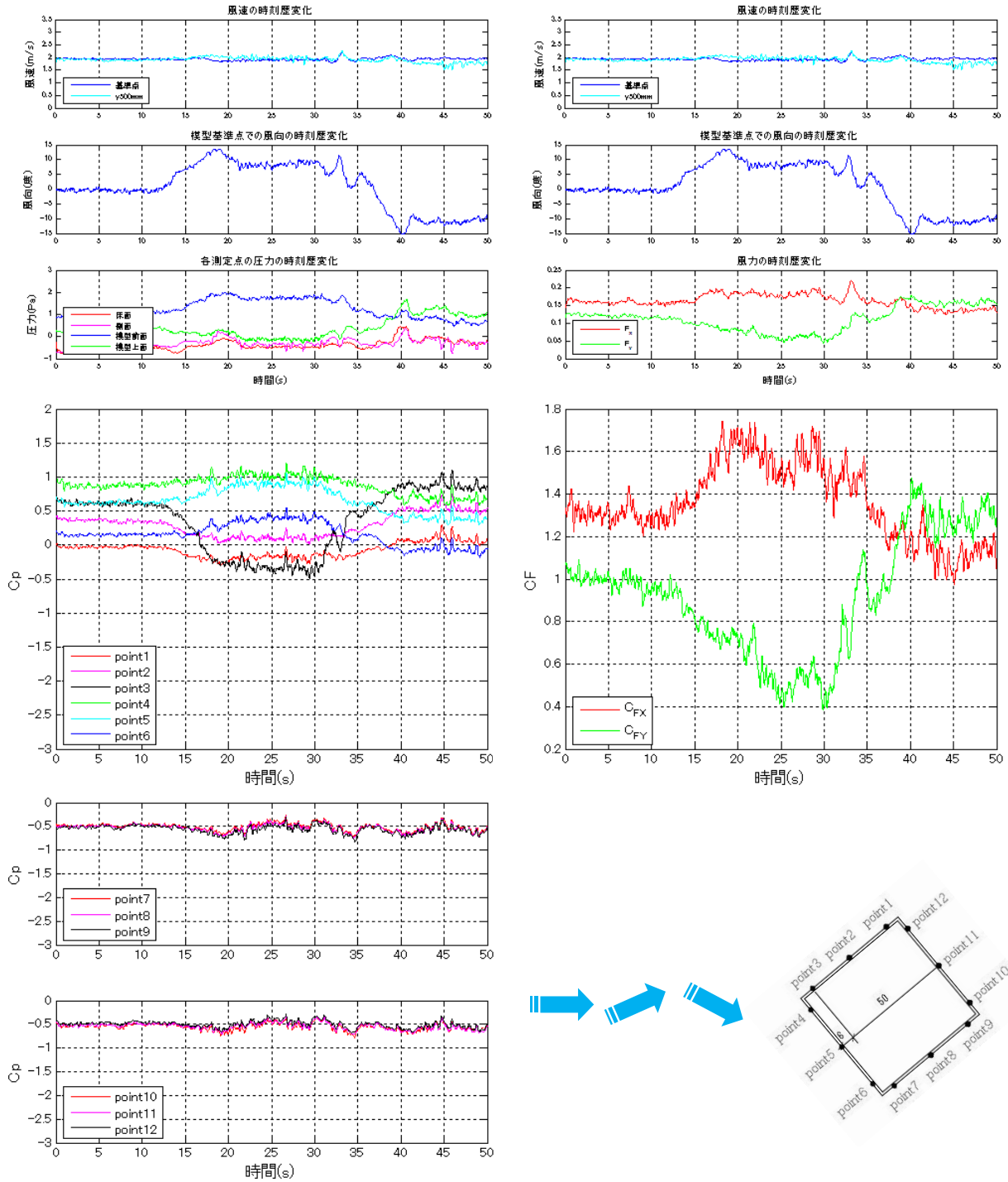


図 NUD10 の 10 秒変化時の模型角度 40° での時刻歴変化

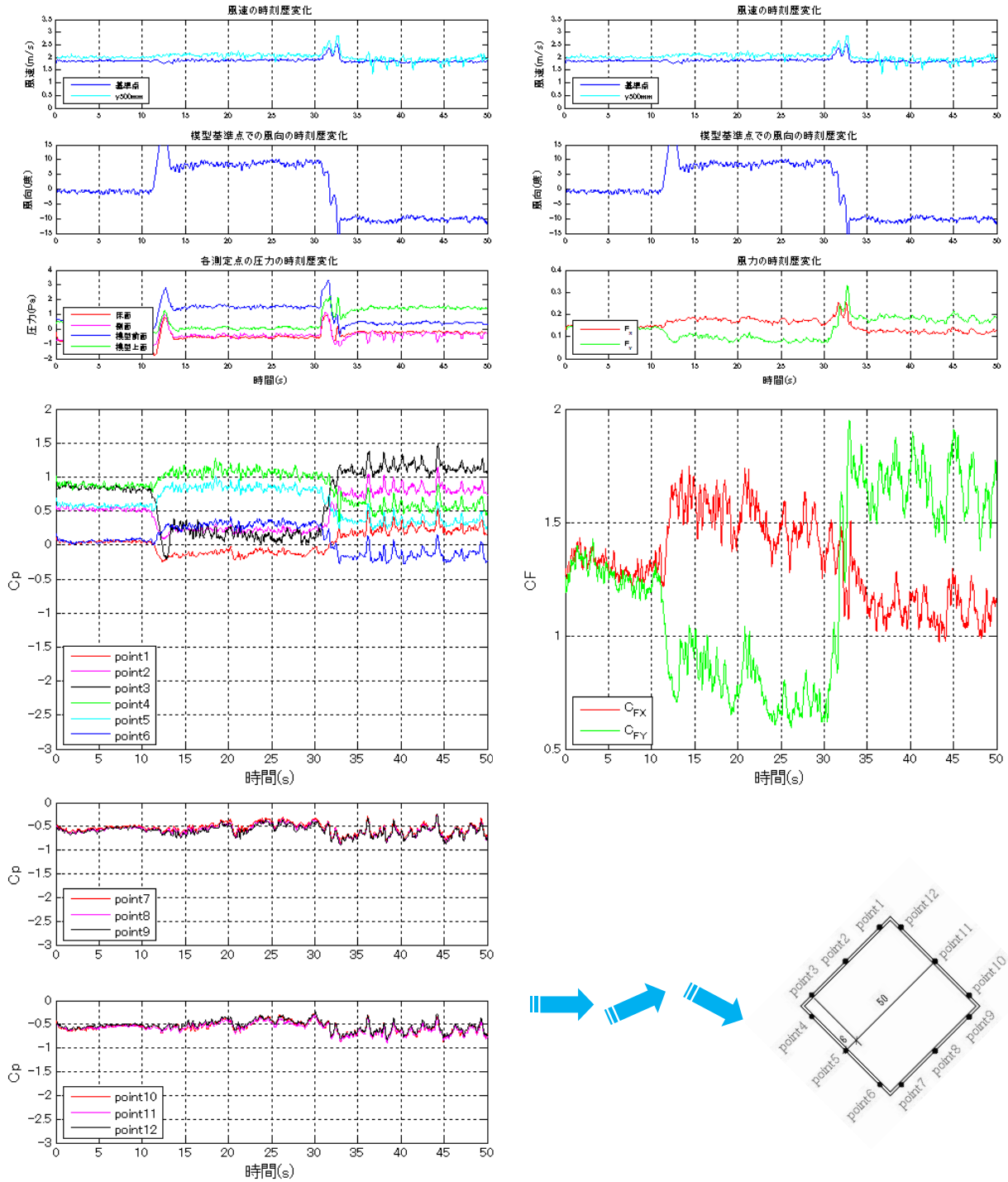


図 NUD10 の 2 秒変化時の模型角度 45° での時刻歴変化

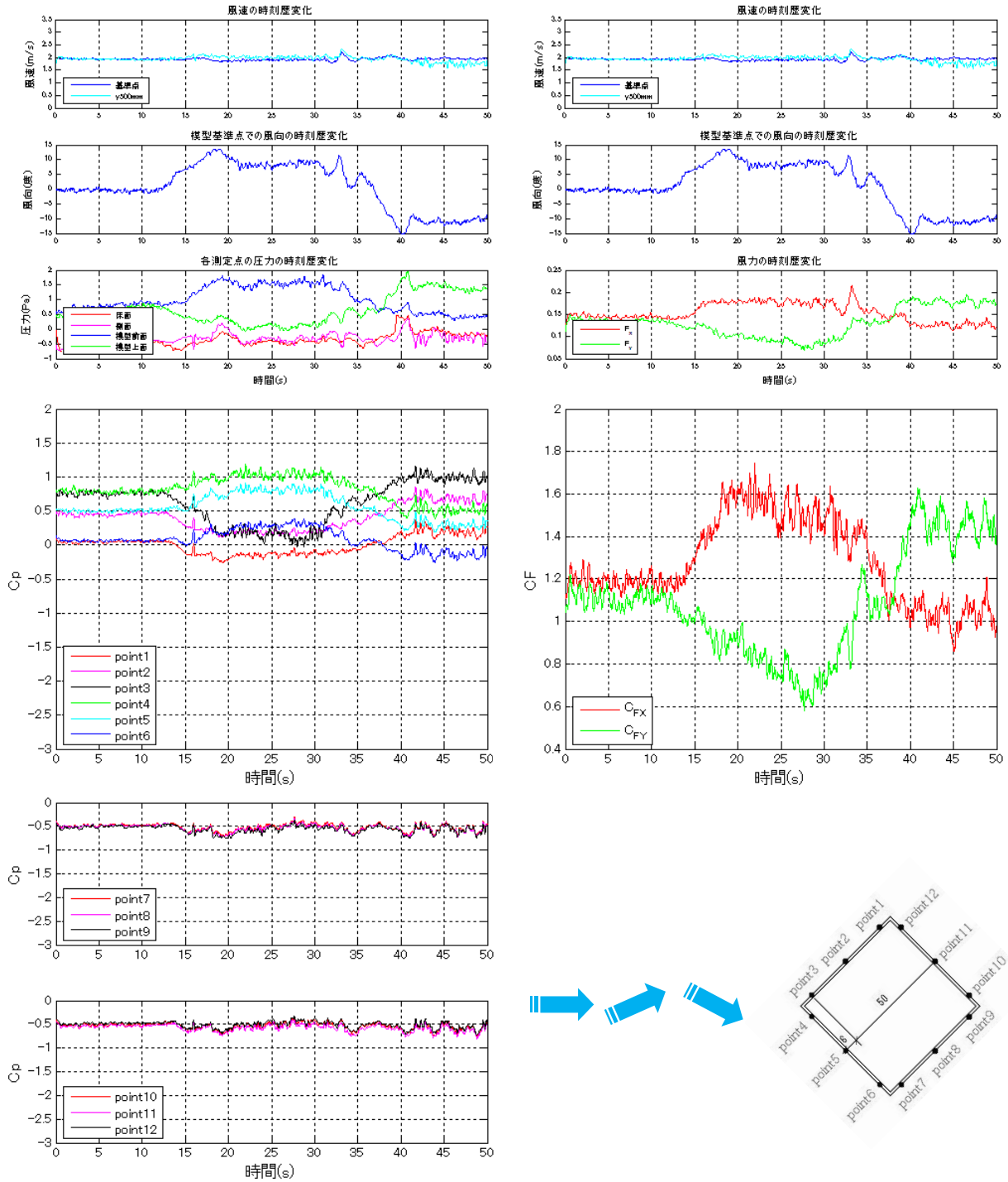


図 NUD10 の 10 秒変化時の模型角度 45° での時刻歴変化

梗概

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

Fundamental Study on Non-Stationary Effects on Buildings under Strong Winds with Direction Change

学籍番号 47-096763
氏名 寺井 亮 (Terai, Ryo)
指導教員 神田 順 教授

1. はじめに

1-1. 研究背景

建物に作用する自然風は非定常なものであることが知られているが、定常流を基本的な考えとする現在の一般的な風洞においては再現性が不十分であり、実験測定値と実測値の間にばらつきがあることが以前より指摘されている。特に風向に注目した場合、一般的な境界層風洞では、風向の変化は定常な風向の乱れとしては再現されているものの、非定常な風向変化を再現することは出来ない。筆者らは今まで1列6段のファンを組み込んだ複数ファン風洞で実験を行い、風向変化時に定常時には見られない負圧・正圧の増大が見られることを確認している。しかし、その現象がどのような物理的要因の下に発生するのかを解明するには至っていない。

1-2. 目的

本研究では、新たに改修、設置された、3列複数ファン風洞(Fig.1)を用いて風向変化を伴う気流作成の基礎的研究を行う。そこで特に非定常な流れ場に着目し、

- 1) 風洞の基本的特性の解明
 - 2) 非定常風向変化気流の作成
 - 3) 非定常気流下における実験手法の確立
 - 4) 風向変化が建物応答に与える影響の解明
- を目的とする。1列複数ファン風洞の時の実験データを逐次対比的に取り上げ、改善点などについて確認する。

2. 風洞の基本特性の確認

全ての各ファンに一樣の入力電圧を与えて一樣な気流を作り、x型プローブの熱線風速計を用いて風速を3次元的に計測することで、風速、風向を測定し、風洞の基本的な特性を把握する。Fig.2に4Vの入力を

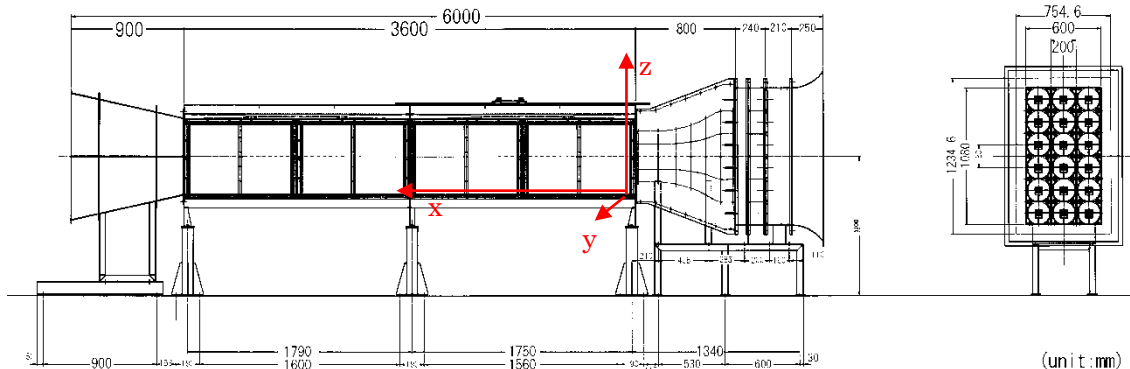


Fig1. 3列複数ファン風洞図面と座標設定

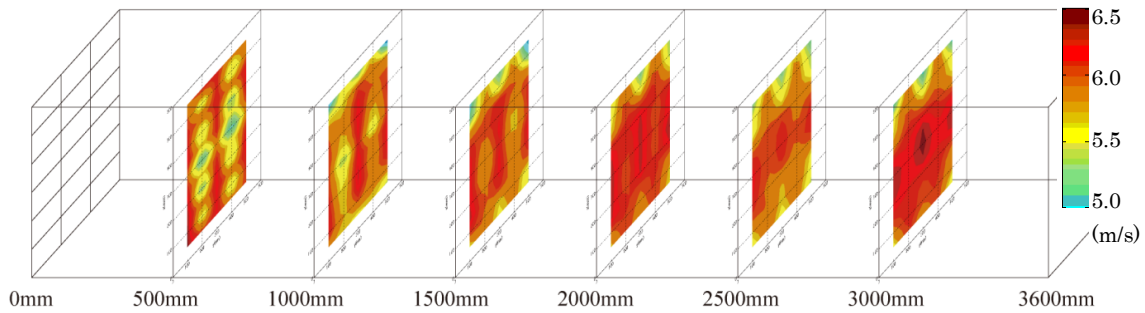


Fig2. 3列複数ファン風洞風速分布

与えた時の風速分布の様子を示す。この検討により、3列に並んだファンの中心線上である $y=100,300,500\text{mm}$ の鉛直線上及び、ファンとファンの境界線上にあたる $y=200,400\text{mm}$ の鉛直線上の分布がそれぞれほぼ一致することが分かった。また、 $y=200,400\text{mm}$ や $z=300\text{mm}$ における風速の低下は、縮流胴の壁面の平らな面における壁面粗度の影響で低下したものであると考えられる。これらから、ファンの配置が風洞内気流の形成に重要な意味を持つこと言える。

また、入力電圧を変化させて計測される風速との関係を調べる。Fig.3 に風速と入力電圧の関係を、Fig.4 にそれぞれ風速の鉛直分布を示す。それぞれの図には、比較のために1列複数ファン風洞における結果を載せている。これらの結果より、同じ入力電圧下では1列の時には3列の時の2/3程度の風速と想定でき、 $y=300\text{mm}$ において1列の時の2/3の入力電圧を与えることで、1列の時と同じ再現が可能であると分かった。

3. 非定常風向変化を持つ気流の作成

本風洞では、各時刻におけるファンの回転数を数値制御することで気流を調整出来る。1列複数ファン風洞の時の実験(Terai and Kanda, 2010)に基づき、上下のファンの回転数に変化を与えて、2次元的な風向変化を

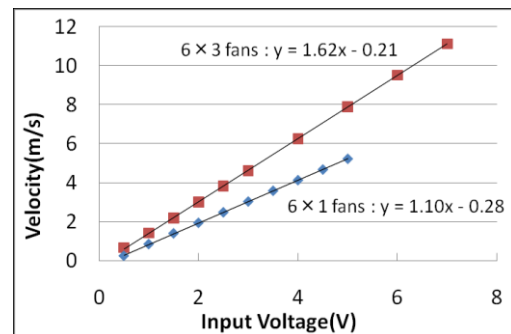


Fig3. 入力電圧と風速の関係

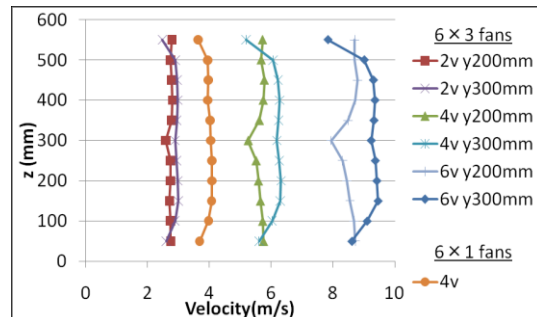


Fig4. $x=1000\text{mm}$ における風速鉛直分布

再現した。3列複数ファン風洞においても風向変化は2次元的なものとするが、ファンをさらに逆回転することで、より大きな風向変化の再現を確立した(Fig.5)。

風向変化の影響のみを考慮した圧力実験を行うことが前提であるので、模型付近では風速・風向の分布が一定であり、なおかつ風向変化時に出来る限り風速の変化が無い方が望ましい。その点に注意して個々の検討を行い、Table1の6つのデータを5通りの変化時間について作成した。データ名

は角度を持たない状態(Neutral : 以下 N と略す)、下向きの状態(Down : D と略す)、上向きの状態(Up : U と略す)の順番と、そのおおよその風向で示されている。一例として測定基準点での NDU5_2sec の時刻歴測定データを Figure6 に示す。短時間の変化では風速が安定はしないものの、最大約 19 度の変化を再現することが出来た。

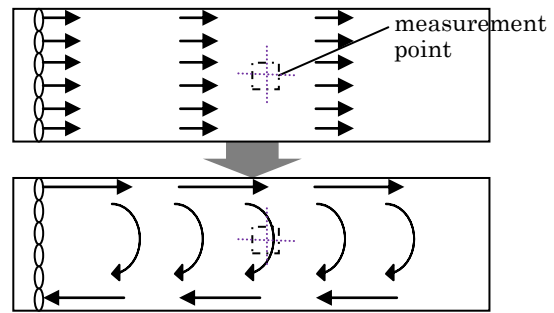


Fig5. 風向変化のメカニズム

4. 風洞内静圧分布の測定

風圧係数の算出には次式が用いられる。

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

1 列複数ファン風洞での実験^{*1}(2009)では、2 秒風向変化時に負圧や正圧のピークが認められたが、この原因が風向変化による $p'(t)$ の変化ではなく基準静圧 $p_s(t)$ の変化である可能性を否定できない。ここでは、その可能性を排除するために非定常変化時の風洞内静圧の変化の様子を確認した上で、最適な圧力実験の方法を考察する。まず、風速が非定常に変化する場合の静圧の変化について実験を行った。その結果、風速上昇・下降時に、風速、測定位置、変化時間に由来するピーク静圧を確認した(Fig.7)。このピーク値は動圧成分に比べて大きく、圧力測定の誤差の要因となることに注意する必要がある。次に、先の実験で作成した Table1 の気流を用いて、非定常風向変化気流下の圧力を調べた。結果の 1 例として、同一平面上の測定点に Fig.6 の気流を与えた時の時刻歴変化を Fig.8 に示す。Table1 の全気流下で同一平面内の測定点で静圧が時々刻々異なっていた。よって、設置するモデルと同条件で変化すると考えられる $z=300\text{mm}$ 以外の測定点は、基準静圧点として利用するのは不適切であると確認した。

Table1. 入力波形

データ名	平均風速 (m/s)	変化角度 (°)	変化時間 (sec)
NDU5	2.43	9.0	2,4,6,8,10
NDU7	2.21	13.8	2,4,6,8,10
NDU10	1.87	19.1	2,4,6,8,10
NUD5	2.40	-9.0	2,4,6,8,10
NUD7	2.16	-13.8	2,4,6,8,10
NUD10	1.88	-19.2	2,4,6,8,10
参考: 1列複数ファン風洞時の測定			
NDU	4.11	9.2	2,10
NUD	4.12	-9.2	2,10

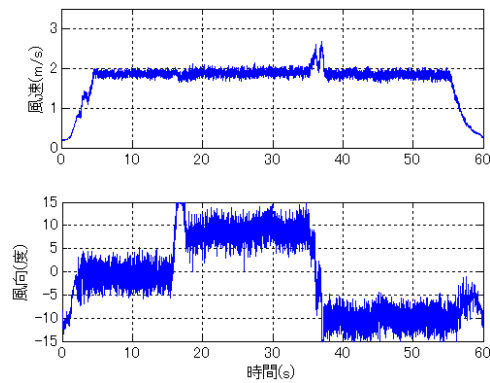


Fig6. NDU10_2sec の風速・風向時刻歴

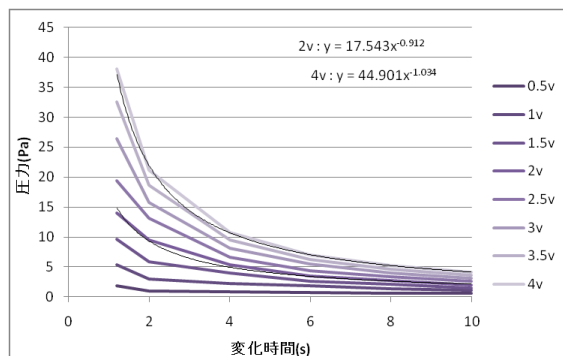


Fig7. 風速増加時のピーク圧

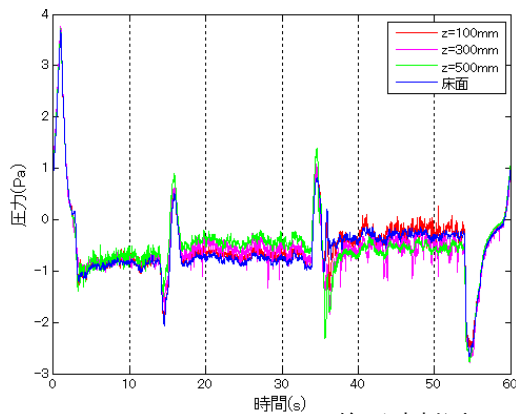


Fig.8. x=500mm での静圧時刻歴

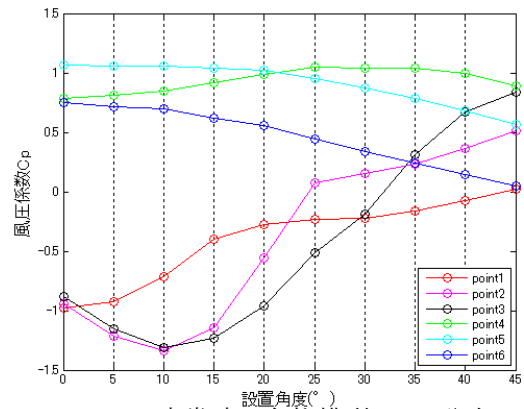


Fig.9. 定常時の角柱模型の Cp 分布

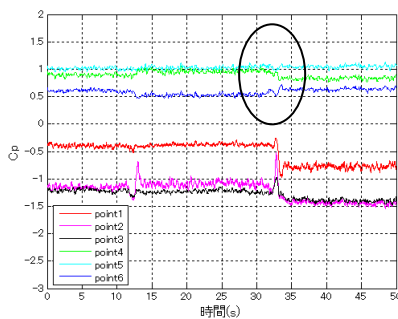


Fig.10. NDU5_2sec_15° の Cp

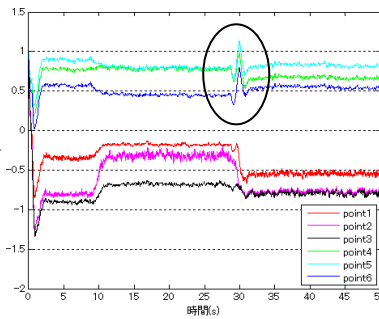


Fig.11. 1列風洞での Cp 時刻歴

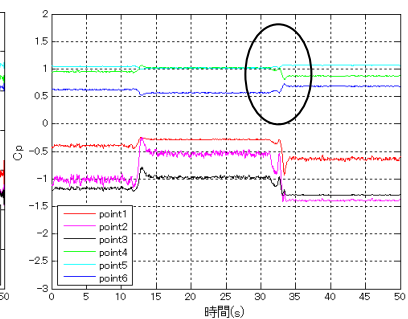


Fig.12. 計算から求めた Cp

5. 風向変化下での角柱表面風圧測定

4 で示した実験方法の下、風洞内に風圧測定用 2 次元角柱模型を設置し、角柱表面の風圧測定を行う。風向変化角度、風向変化時間、模型設置角度を実験のパラメータとし、300 ケースの測定を行った。

定常時の風圧係数測定値を Fig.9 に示す。また、非定常時の測定結果の 1 例として NDU5_2sec_15° の時の結果を Fig.10 に示す。Fig.11 は同条件における 1 列複数ファン風洞における結果であるが、図にあるようなピークは Fig.10 では見られなかった。また、Fig.9 の測定値を角度ごとに適用したものが Fig.12 であるが、point2 を除いて Fig.10 とよく一致していることが分かる。このように、改善した実験手法によって不自然な圧力値は解消されたといえる。

6. 結

以上の実験の結果及び考察から、各目的に対応する以下の知見を得た。

1) 風洞内気流の形成には各ファンの並びと縮流の具合が関係してくる。

2) 約 20 度までの変化角度の気流を 2 秒程度以上の変化時間で作れることを確認した。

3) 非定常変化時の静圧のピークの様子について確認し、静圧測定孔などについて最適な実験手法を考案した。

4) 非定常気流下で模型表面圧力測定を行い、入力した角度に応じた圧力の非定常な変化を確認した。風向変化時に 1 列の時に見られたようなピーク値は見られなかった。

参考文献

*1. 複数ファン風洞による非定常な風向変動が 2 次元角柱風圧特性に与える影響に関する研究(2009)

謝辭

謝辭

謝辭

謝辞

謝辞

本論文の作成にあたり、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の神田順教授の懇切丁寧なご指導と適切な御助言をいただきました。御忙しい身でありながら、御歳を感じさせない活動的な姿にも大変元気を分けていただきました。心から感謝を申し上げます。

風洞の改修・設計にあたり、荏原ハマダ送風機株式会社の久世悦雄さんと藤井直也さんには何度も風洞に足を運んでいただきました。株式会社共和電業の小林亮さんには風圧測定装置の不具合で何度も連絡を入れさせていただきました。日本カノマックス株式会社の高原純市さんにも何度もご足労いただきました。大変感謝しております。

工学系研究科・工学部 建築学専攻の高田毅士教授には、神田・高田研究室合同研究室会議や研究室合宿の場において、参考となる貴重なご意見をいただき、感謝しております。

いつも明るく事務作業に対応して下さった秘書の小澤亜矢子さんには本当に感謝いたします。

また、研究に身を費やす姿、愚痴る姿、演じる姿、スポーツをする姿、遊ぶ姿など、様々な様相を見せてくれ、マンネリになりがちな日々を活を入れていただきました、研究室の皆様には本当に感謝しております。本当にありがとうございます。

最後に、どんなに迷惑をかけても支え続けてくれた父と母と兄と弟と妹と犬に深く感謝の気持ちを述べたいと思います。本当にありがとうございました。

2010年1月24日

寺井 亮