

## (2) ファンの停止時間を变化させた場合

ここでは、ファンの停止時間を变化させた場合の考察を行う。それぞれの風速及び風向の時刻歴変化は、図 4.45 から図 4.52 を参照していただきたい。図 4.45 から図 4.48 に示した風速及び風向の時刻歴変化から、ファンの停止時間が 2 秒、5 秒の場合は、ファンを停止した直後に風速や風向がオーバーシュートしている様子が確認された。これらから、ファンの動きに気流の動きが追随していない可能性があることが分かる。それに対し、図 4.49 から図 4.52 に示した風速及び風向の時刻歴変化から、ファンの停止時間が 10 秒や 20 秒では、オーバーシュートは確認されず、ファンの動きと一致していることが分かった。

そこで、ファンの停止時間と風速のファン停止時間における乱れの強さの関係を算出した。風速の乱れの強さとは、風速の標準偏差を平均風速で除したものである。その結果を図 4.49 に示す。参考のために、case002 でファンの停止時間を変えた場合の乱れの強さも示した。実線が case001 の場合、点線が case002 の場合である。凡例は z 方向の高さを表している。

case001 における z=100mm での乱れの強さは他の高さに比べて明らかに大きく、その値は 20%程度となっている。case002 では、他の高さに比べて乱れの強さは明らかに大きいですが、ファンの停止時間にはあまり影響を受けていない。それ以上の高さにおいては case001、case002 とも、ファンの停止時間によらず 5%程度のはぼ一定の乱れの強さとなっており、安定していることがわかる。

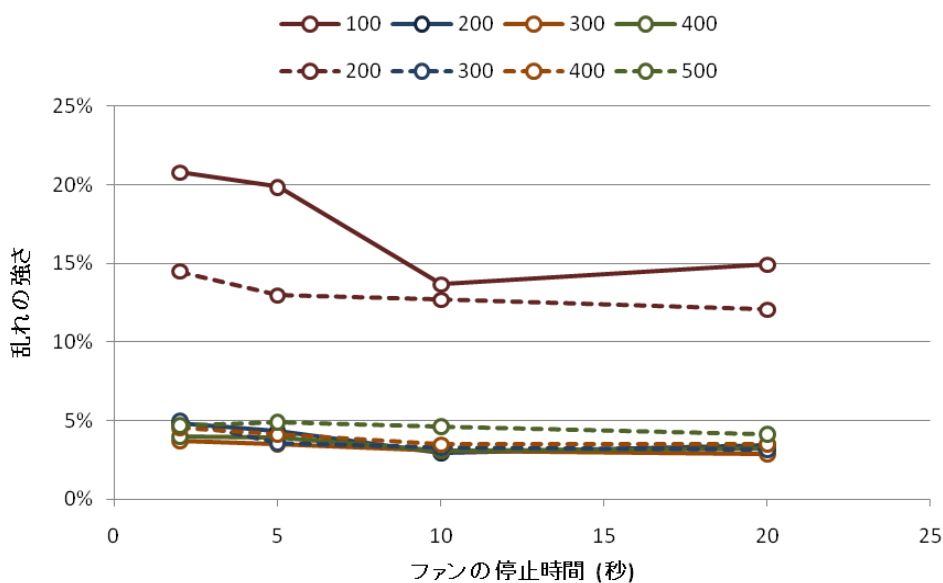


図 4.69 ファンの停止時間による乱れの強さ

これらから、ファンを停止した部分のすぐ近く以外は、ファンの停止時間を増やすほど安定した動きになっていそうであることが分かる。ただし、case001 のファンを停止した部分のすぐ近くに限定してみると、10秒でファンを停止した場合よりも、20秒でファンを停止した場合の乱れの強さが大きくなっている。しかし、case002 ではそのような現象は発生していないことから、今後検討すべき事項ではあるが、それほど重要な問題ではない可能性が高い。

これらから、ファンの停止時間は2秒、5秒に比べれば、10秒以上の方が安定していることが分かる。しかし、ファンを停止したすぐ近く以外では、2秒から20秒で安定した変化が確認された。

前述した久保らによる「圧力勾配方向の制御による風向変動風洞の試作」<sup>5)</sup>では、風向変化の時間と風速の無次元標準偏差(標準偏差を平均で除したもの)の関係を求めている(図4.70)。

久保らの研究では、風向変化の間隔が5秒で最も安定したのに対し、本研究のcase001のz=100mmにおいては10秒で最も安定していることが分かる。ただし、ファンを停止したすぐ近く以外では、乱れの強さは5%程度であり、久保らの風洞における2風路での無次元標準偏差と同程度の値を出している。ただし、本風洞での風向変動は6度程度であるため、風向変動の大きさに対しての風速の乱れは大きいことになることに注意が必要である。

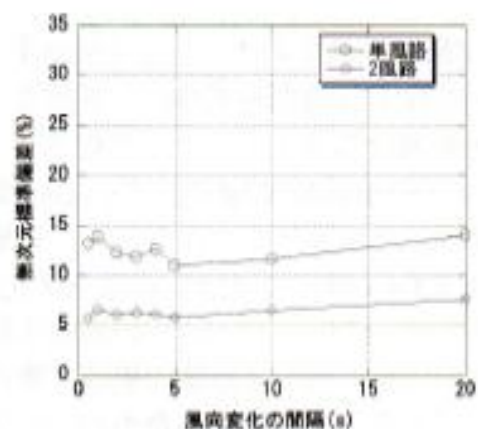


図 4.70 無次元標準偏差と風向変化の間隔

### (3) ファンを強めた場合

図 4.71 は case010a+, case 010b+, case 020+の変化後の安定した状態である 29 秒時点に対して変化前の安定した状態である 11 秒時点の風速がどれだけ減少したかを示したものである。

図 4.72 は case010a+, case010b+, case020+の変化後の安定した状態である 29 秒時点に対して変化前の安定した状態である 11 秒時点の風向がどれだけ減少したかを示したものである。

それぞれの風速及び風向の時刻歴変化は、図 4.53 から図 4.58 を参照していただきたい。

case010a+と case010b+の風速の変化を見ると、ファンを強めた部分から 100mm 離れた位置で、風速の減少がほぼ 0 であった。また、case020+の風速の変動を見ると、同様に 100mm 離れた位置で 0 に近い値が出ていた。すなわち、ファンを強めた近くでのみ変化が起こったことが分かる。

case010a+と case010b+の風向の変化を見ると、ファンを強めた位置の上部では、水平に流れていた気流の風向が上向きに変化する様子や下部で水平に流れていた気流の風向が下向きに変化する様子が確認された。

既に、ファンを停止した場合にはその部分に気流が流れ込む様子が確認されているが、逆に、ファンを強めた場合にはその部分から気流が流れ出す様子が確認出来ることが分かった。また、中心部を停止した場合の風向変化とほぼ同程度の変化が発生していることが分かった。

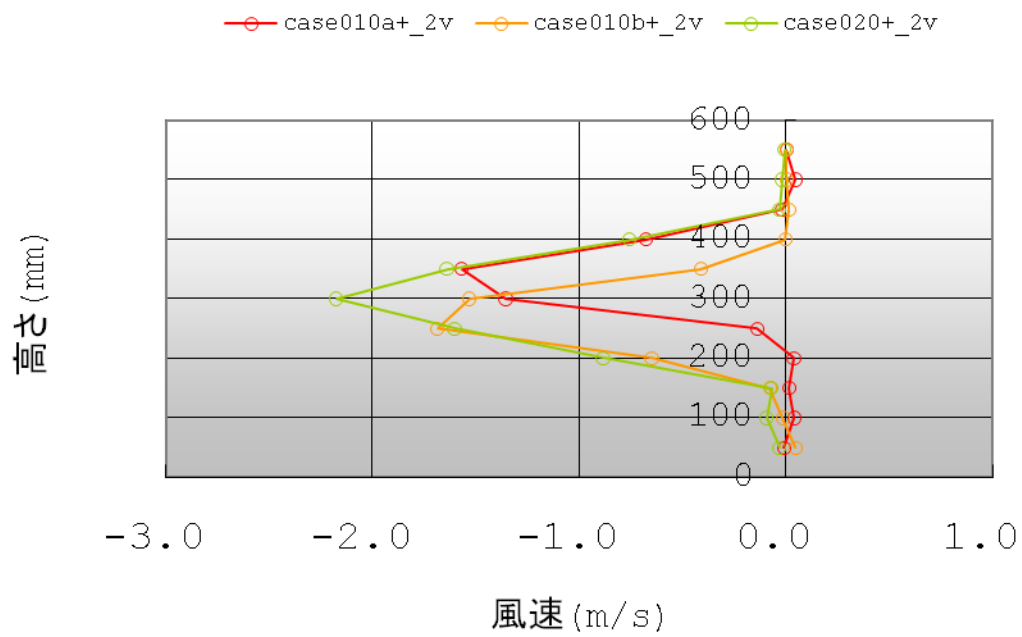


図 4.71 風速の変化(case010a+, 010b+, 020+)

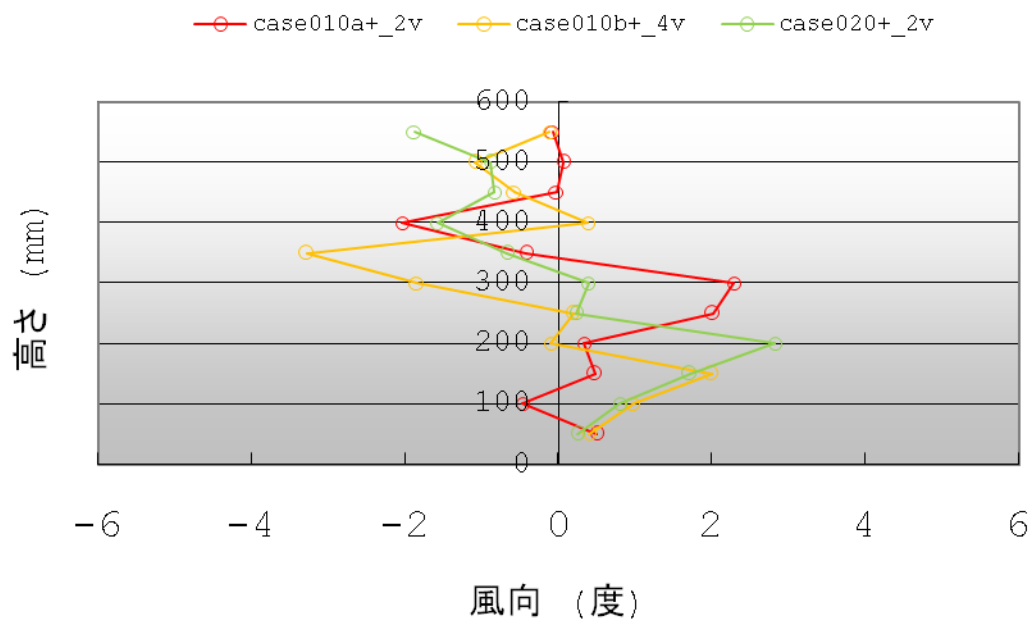


図 4.72 風向の変化(case010a+, 010b+, 020+)

#### (4) ファンの強弱を組み合わせた場合

図 4.73 は case020A, case020B の変化後の安定した状態である 29 秒時点に対して変化前の安定した状態である 11 秒時点の風速がどれだけ減少したかを示したものである。

図 4.74 は case020A, case020B の変化後の安定した状態である 29 秒時点に対して変化前の安定した状態である 11 秒時点の風向がどれだけ減少したかを示したものである。

それぞれの風速及び風向の時刻歴変化は、図 4.59 から図 4.62 を参照していただきたい。

風速に関して、case002 の場合には、ある高さから上部で一定の風速の減少が確認されたことに対し、上部で風速を増加させたことによって、高さ方向の風速の変化に増加と減少も入り混じっている様子が確認された。ただし、その変化は概ねファンの変化に対応していることが分かる。このとき、比較的大きい風向変化が起こっているにも関わらず、ファンを停止したすぐ上部での風速の変化とは case002A で 1.0m/s, case002B で 1.5m/s 程度であることが分かった。

風向に関しては、比較のために case002 を取り上げた。z=250mm から上部では、case002A, 002B とともに似た風向変化が得られた。ファンを停止したすぐ上部に位置する z=200mm での風向変化は、case002 では 6 度程度であったのに対し、case002A, case002B では 9 度程度であることが確認出来た。予想通り、ファンの強弱を組み合わせることによって、測定ケースの中で最も大きい風向変化が得られた。

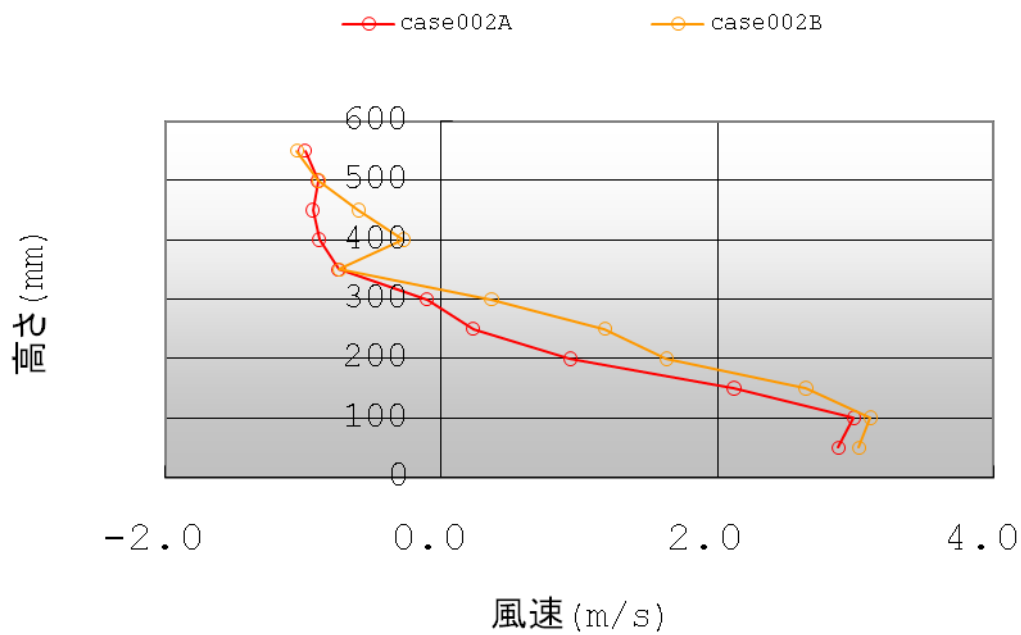


図 4.73 風速の変化(case002A, 002B)

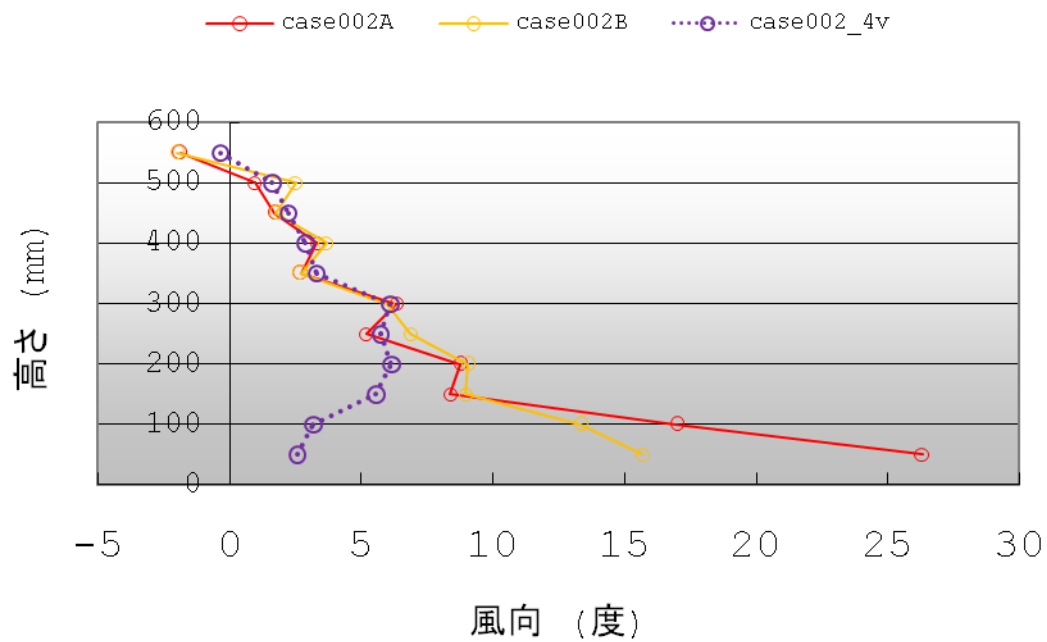


図 4.74 風向の変化(case002A, 002B)

#### 4. 4. 2 実測のデータとの比較

「正方形平面の風応答・風向特性に対する風向の非定常性の影響」<sup>6)</sup>によると、1998年9月16日の台風時の2時から10分間の自然風での主流方向風速、主流直角方向風速及び風向の時刻歴波形は図4.75、図4.76、図4.77のようである。

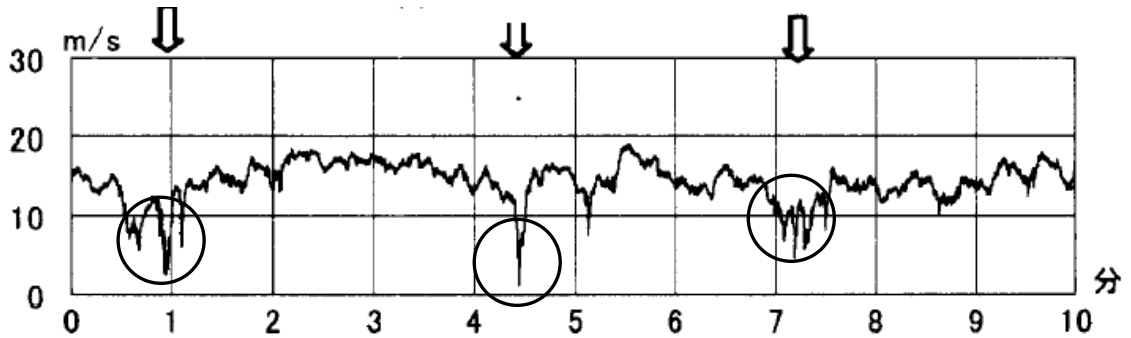


図 4.75 主流方向の時刻歴波形

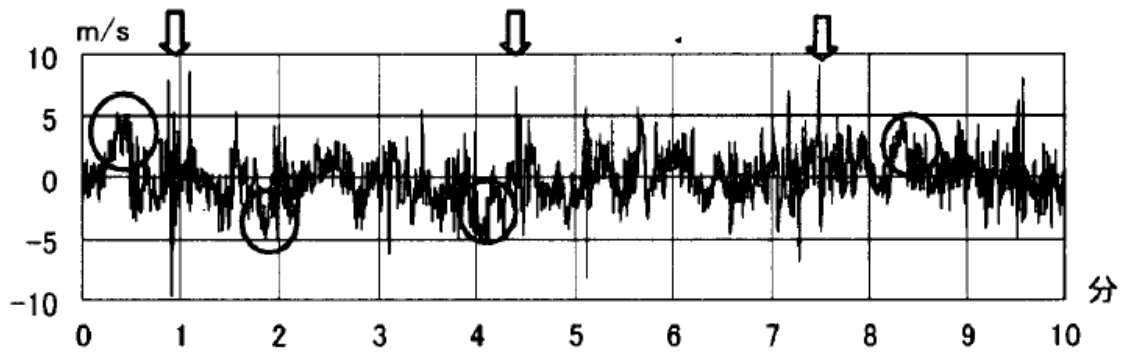


図 4.76 主流直角方向の時刻歴波形

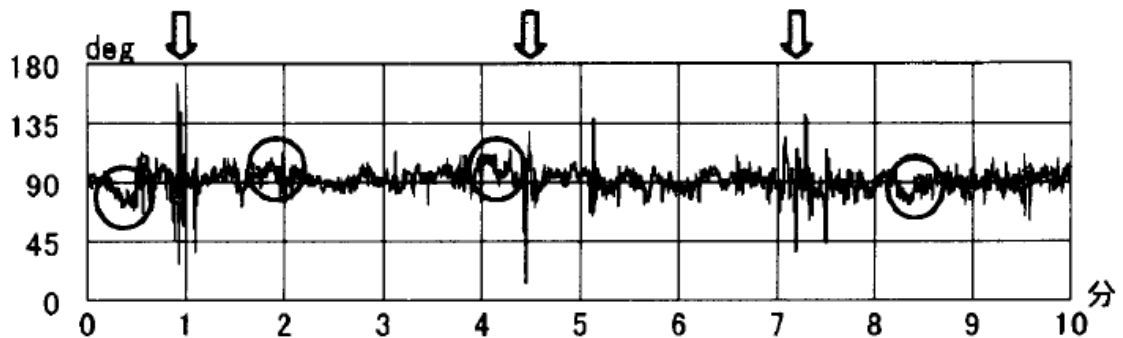


図 4.77 風向変化の時刻歴波形

自然風での主流方向風速の変動は、○印のように低下する場合がある。こうした主流方向風速の低下は、実験では再現されておらず、自然風での乱れ強さが実験時と比べ大きいことの一要因でもある。このように、自然風では10分間程度の時間内でも風速値は必ずしもほぼ一定ではなく、一時的に低下する場合もあることが分かる(図 4.75)。また、図 4.76 においても確認されるような数10秒間の数10度程度の風向変化が、建物に影響を与える可能性 ha

既往研究でも指摘されている。図から、このような風向変化が発生する時間は、10秒から20秒程度であることが分かる。ちなみに、本風洞では、時間の縮尺率1/10を想定しているので、2秒間から20秒間の風向変動が可能であることは、20秒から200秒に相当し、適した値になっていることが分かる。

また、「台風9119号による宮島・厳島神社の被害について」<sup>7)</sup>に1991年の台風19号が到来したときの、広島地方気象台の風速・風向データがある(図 4.78)。ここからも、風速の変化に関しては、20m/s程度の変化が発生していることが分かる。前述した縮尺率であると想定すると、例えばcase002Bでは、1.5m/s程度の風速変化を作り出せることから、実際の15m/s程度に相当することが分かる。

風向の変動特性に関しては、図 4.77 に示すように、主流方向風速が低下する時刻で比較的大きな変動が生じている場合が多く、その風向変化の幅は45度以上に達する。また、このような急激で大きな風向変化とは別に、10秒程度ではあるが、10分間平均風向とは異なる風向に変化したまま維持されているような状態も多々見受けられる。本研究では10度程度の風向変動が可能であることが確認されており、このような風向変化を持つ自然風を模擬することが出来る可能性がある。

このように、本風洞では45度以上の大きな風向変動を齎すことは出来ないが、自然風に存在するような10分間平均風向とは異なる10度程度の風向を数10秒程度与えることは出来そうであることが分かった。

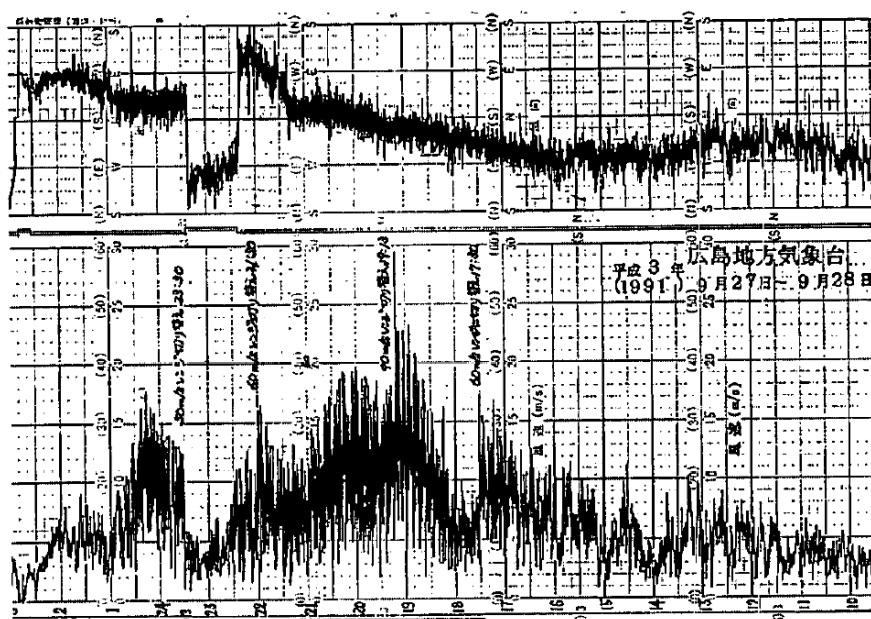


図 4.78 広島地方気象台の風向、風速の変化



## 4. 5 おわりに

本章では、アクティブ型風洞の 1 つである複数ファンを持つ本風洞においてどの程度の風向変化が起きるかを詳細に測定した。ただし、その風向変動については本風洞での風向変化に関する研究が存在しないため、単純なケースを応用していく形で実験を進めた。測定した種類を大きく分けると、ファンを停止した場合、ファンの停止時間を変えた場合、ファンを強めた場合、ファンの強弱を組み合わせた場合の 4 種類である。

図 4.79 にすべてのケースの最大の風向変化角を示す。

まず、ファンを停止した場合の風向変化は最大 6 度程度であることが分かった。ここで重要なのは、ファンを止める数が多くなればなるほど風向の変化が大きくなるというわけではないことであった。この風洞に関して言えば、2 つのファンを停止した場合と 3 つのファンを停止した場合の風向変動は同程度であった。

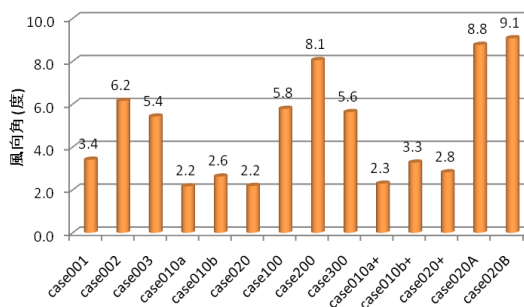


図 4.79 ケースごとの最大の風向角変化

次に、ファンの停止時間について、性能上最小限の停止時間である 2 秒間で測定を行ったところ、風向や風速が停止した直後にオーバーシュートする現象がある可能性があったため、停止時間を 5 秒、10 秒、20 秒に変えた場合のケースを測定した。その結果、ファンを停止した部分のすぐ近くの位置以外では、すべての停止時間で安定していることが確認された。ただし、case001 においてファンを停止したすぐ近くの位置では、その変化は停止時間が 10 秒のときに最も安定していた。

そして、ファンを強めた場合には、風向変動は比較的小さいもののファンを強めた部分からその上下に気流が流れ込む様子が確認された。

最後に、ファンの強弱を組み合わせた場合の測定を行った。ファンの下部を止め、ファンの上部の回転数を上げるケースを測定した結果、本研究で最も大きな 9 度程度の風向変化が起きることが確認出来た。

すなわち、今回の風洞実験で風向変化が大きかったケースはファンの強弱を組み合わせた場合の case002A, 002B であり、その風向変化は 9 度程度であることが分かった。ここで風向の変化時間は 2 秒から 20 秒において、既にその安定性が確認出来ていることから、この範囲で変化時間を設定することが出来そうである。

これらから、本風洞でさらに大きな風向変化を与えることが出来るかどうかは、今後検討が必要ではあるが、少なくとも本実験から、本風洞において建物に影響を与えると考えられる自然風の数 10 秒程度で 10 数度の風向変化を再現出来る可能性が高いことが確認できた。

## 参考文献

- 1) 野村卓史・北側徹哉・鈴木洋司・赤松弘一郎, AC サーボメータ風洞による合成気流の変動特性, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, 2000
- 2) 野村卓史・関野洋一郎・鈴木洋司, 風向が時間変化する気流による非定常空気力の測定, 第 17 回風工学シンポジウム論文集, 2002.
- 3) 瀧山泰士・森暁一・木村吉郎・久保喜延・加藤九州男, 風向変動風洞の風向変化性能の検討, 日本風工学会誌, 第 32 巻第 2 号, 2007
- 4) 池内淳子・谷口徹朗・谷池義人, 瞬間的な風向変化により外装材に作用する風圧力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002
- 5) 木村吉郎, 徳永拓也, 久保喜延, 加藤九州男, 圧力勾配方向の制御による風向変動の試作, 日本風工学会年次研究発表会・梗概集, Vol. 2005 (2005), 2005
- 6) 鈴木雅靖, 田村哲郎, 眞田早敏, 山本学, 正方形平面の風応答・風向特性に対する風向の非定常性の影響: 実測と風洞実験結果との比較に基づく一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 550 号, 2001
- 7) 花井正実, 三浦正幸, 玉井宏章, 台風 9119 号による宮島・巖島神社の被害について, 日本建築学会構造系論文集, 第 447 号, 1993

## ■ ■ 5. 風圧測定実験

## 5.1 はじめに

図 5.1 は、風向 0 度と 45 度の屋根面の平均風圧係数分布である<sup>1)</sup>。これらを見ると、まったく異なる形状をしていることが分かる。風洞実験による圧力測定からも明瞭に観察されるように、建物表面の風圧分布は風向により大きく影響を受けていることが明らかであり、建物の耐風設計では慎重な配慮が重要となってくる。すなわち、前述したように、実現象のように風向が非定常性を有している場合、風向が変化している僅かな時間でも、その継続時間次第では応答が発散したり、変化した風向での応答値に達して、10 分間平均風向での予測応答値を上回ったりする危険性を否定出来ない<sup>2)</sup>。

谷池らによる「瞬間的な風向変化により外装材に作用する風圧力」<sup>3)</sup>では、得られた風向変化区間を風程(風の軌跡)で表し、風程が小さいほど風向変化の瞬間性が高いことを示している。また、自然風中における現象を単純化するために、模型を回転することにより風向変化を模擬した風洞実験を行い、建物屋根面隅角部において負のピーク風圧が急降下する現象を見つけ、この原因が屋根面上の円錐渦が瞬間的な風向変化によりストレッチされるためであることを示している。さらに、自然風中のストレッチ現象を確認し、この時のピーク風圧係数は建築基準法で定められた最大ピーク風圧係数を上回る危険性のあることを示している。

そこで、本章では、作成した風向変化がどのような風圧を与えるかを探るため、4 章で行った風向変動実験の結果をもとに風圧実験を行う。特に、水平の模型に対して風向が変化する風を吹かせた場合と従来可能であった角度を付けて設置した模型に一様流を吹かせた場合とを比較することで、この種の実験の意義を検討する。

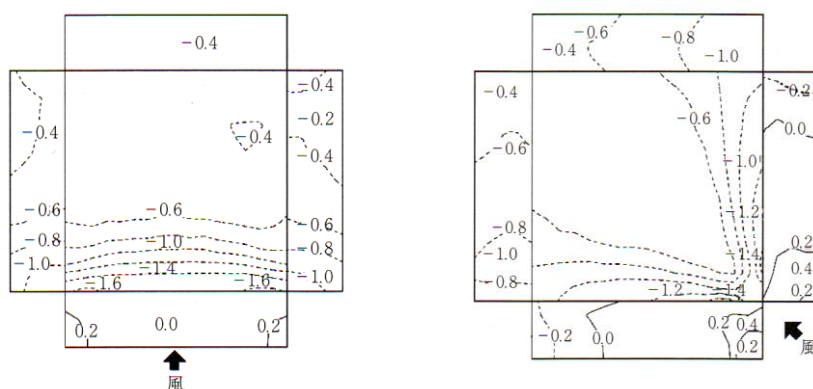


図 5.1 風向の違いによる平均風圧係数分布

## 5. 2 実験概要

### 5. 2. 1 測定方法

風圧測定は以下の機器を用いて行った(表 5.1).

表 5.1 風圧測定機器

圧力計	DIGITAL MANOMETER MODEL PZ-77      Serial No. C-41
ピトー管	ツクバリカセイキ株式会社
測定・制御用コンピュータ	DELL OPTIPLEX 260

また、圧力計の模式図を図 5.2 に示す。圧力計は 60 点の同時計測が行えるが、本研究では、模型の測定点が 6 カ所のため、ch1 から ch6 までを測定に用いた。ピトー管及び 6 点それぞれの風圧は、コンピュータに圧力(mmAq)の形で出力される。

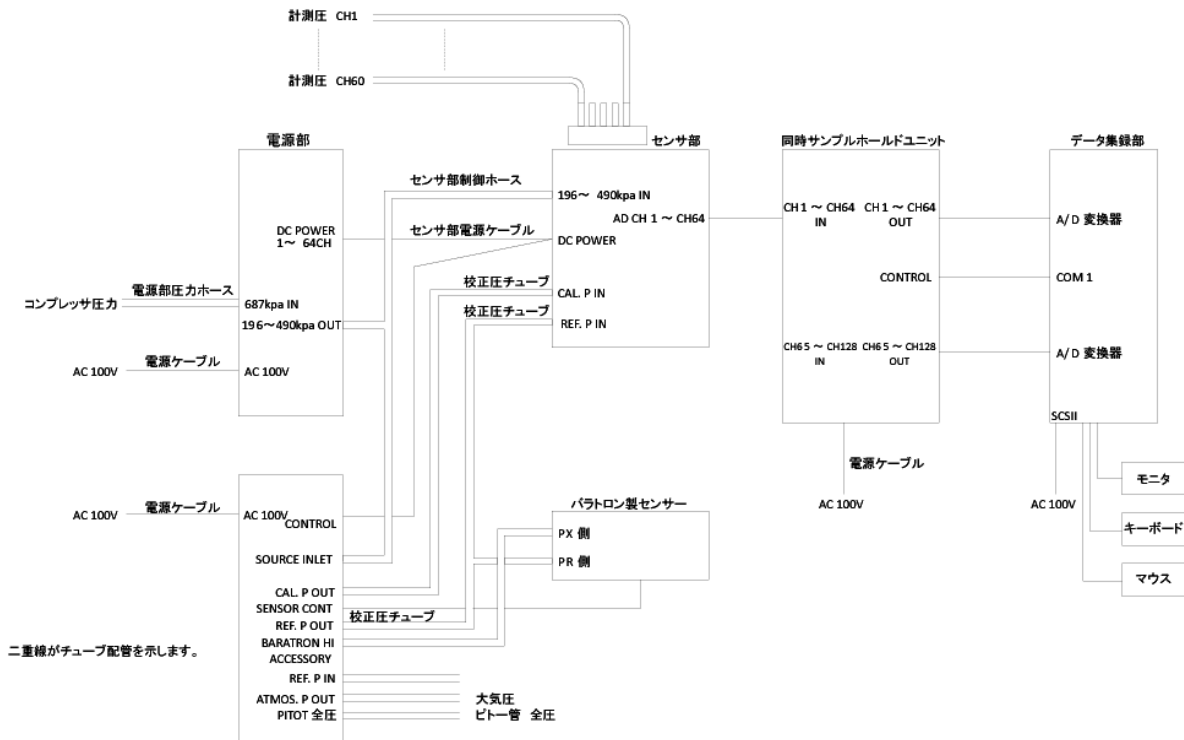


図 5.2 圧力計模式図

風圧模型は風工房(株式会社風技術センター)に製作を依頼した。模型上部と側面に3点ずつ計6点の測定点を設けた。本風洞では、風洞測定部の幅が200mmであるため、3次元での測定は困難である。そのため、用いた模型も幅を風洞測定部と同じ200mmにし、測定洞の幅の中心軸上に測定点を設けた。図5.3に示すように、模型は高さ200mm×幅100mm×奥行き100mmであり、6つの測定点は、模型上部の端から順にpoint1, point2, …, point6と呼ぶことにする。これは、谷池ら<sup>3)</sup>による実験における模型の大きさを参考にしてしている。

また、気流に対する模型の角度を変えられるよう模型を設置する板の角度を、0度、5度、10度、15度の4種類用意した(図5.4)。また、模型はpoint3がx=900mm, z=300mmになるよう設置した。

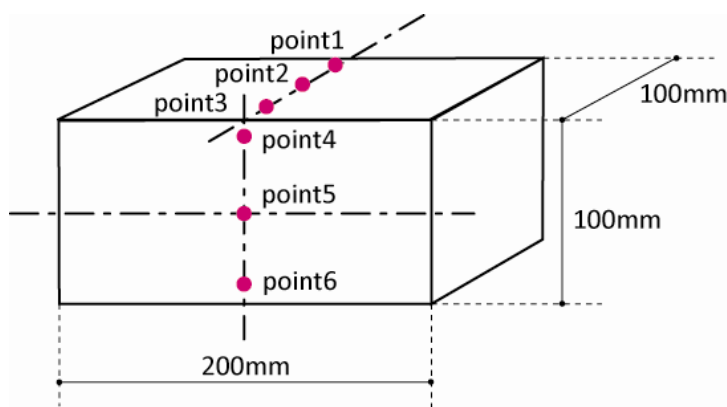


図 5.3 風圧模型

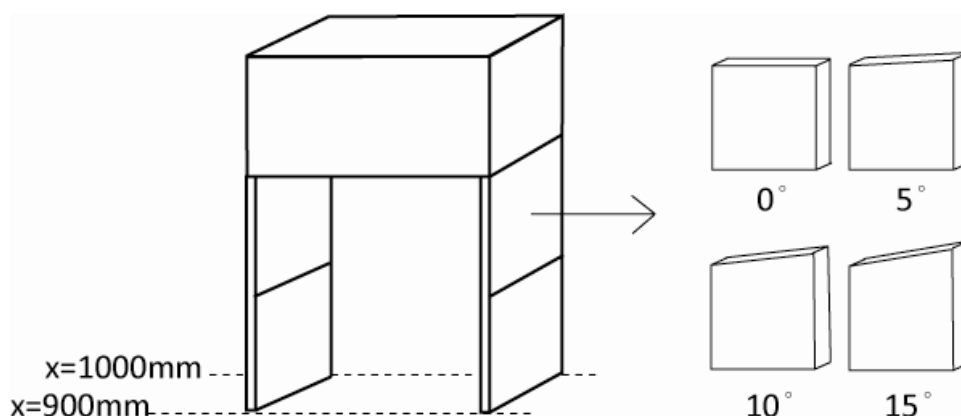


図 5.4 風圧模型を支える板の種類

## 5. 2. 2 測定ケース

4章の風向変動実験の結果から、風向変化の大きさは、case001よりcase002のほうが大きく、case003はcase002とほぼ同じであることが分かった。この結果から風圧測定実験においては、case002を基準としたいくつかのケースの測定を行った(図5.5)。

まず、最も基本的である全てのファンを一定に運転し、一様流を生成するcase000の風圧測定を行った。

次に、ch1, ch2を停止するcase002の風圧測定を行った。そして、風向変動実験において、ファンの停止時間が10秒のとき、比較的安定した乱れの強さであったことから、case002\_10(ch1, 2を10秒間で停止する)及びcase002\_10\_c(ch1, ch2を10秒間でコサインカーブを描きながら緩やかに停止する)の風圧測定を行った。

最後に、4章で最も風向変化が大きかったファンの強弱を組み合わせたcase002A及び002Bの風圧測定を行った。ファンを停止する時間は、これまでと同様に、2秒、10秒の2種類とした。

さらに、以上に示したような本風洞で作成可能な風向変動を持つ風と従来可能であった実験と比較するために、風向0度の一様流を吹かせた状態で、角度を付けて設置した模型への風圧を測定した。前述したように模型を設置できる角度の種類は、0度、5度、10度、15度である。これは、既往の研究でも風向10度から15度の付近で風圧力が最大を示すことが明らかにされているためである<sup>1)</sup>。一般的に従来の研究では、風速ピトー管を模型の基準高さと同じ高さにして測定を行うが、本研究では、風洞の幅が200mmしかないために、同じ高さにピトー管を設置することが困難である。そこで、ピトー管を350mm, 400mm, 450mm, 500mmに設置して、それぞれ計測を行った。

case 000	ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	ch6			1																													
ch5			1																														
ch4			1																														
ch3			1																														
ch2			1																														
ch1			1																														

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

ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
case 002_10			1																												
ch6			1																												
ch5			1																												
ch4			1																												
ch3			1																												
ch2			1																					0							
ch1			1																					0							

ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
case 002_10 c			1																												
ch6			1																												
ch5			1																												
ch4			1																												
ch3			1																												
ch2			1																						0						
ch1			1																						0						

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

ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
case 020A _10			1																												
ch6			1																												
ch5			1																												
ch4			1																												
ch3			1																												
ch2			1																												
ch1			1																												

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

ch/sec	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
case 020B _10			1																												
ch6			1																												
ch5			1																												
ch4			1																												
ch3			1																												
ch2			1																												
ch1			1																												

図 5.5 風圧測定実験の測定ケース



### 5.3 模型による気流形状の変化とピトー管位置の検討

模型を置いたときにどの程度風洞内の気流を変化させるかを確認するため、最も基本的な、一様流である case000 の測定を行った。その結果を図 5.6 に示す。

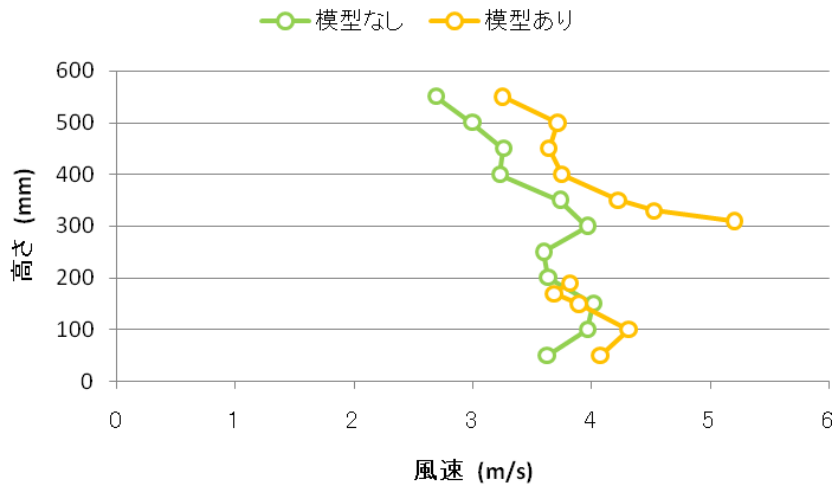


図 5.6 模型の有無による気流の変化

模型を置くとその分の風が模型上部と下部に流れ込むことから、模型がない場合の風速よりも、模型がある場合の風速の方が高くなることが分かった。特に下部よりも上部へ風が多く流れ込んでいることが分かる。また、 $z=310\text{mm}$  において、風速が  $5\text{m/s}$  を超えるほど大きくなっていることから、模型のすぐ上部で風が加速している現象が確認出来る。一方、下部においては、模型近くでは風速があまり変化せず、 $z=100\text{mm}$  で風速が高くなっている。

前述したように本実験ではピトー管を  $z=350\text{mm}$ ,  $400\text{mm}$ ,  $450\text{mm}$ ,  $500\text{mm}$  に設置している。そのため、まず、一様流の状態、それぞれの高さにおける模型の風圧を検討する。

風圧の変動の大きさの目安として、(5.1)式に示したように、変動風圧力の標準偏差  $\sigma_p$  を基準速度圧  $q_R$  で無次元化した変動風圧係数を用いる。また、今後はこの変動風圧係数のことを単に風圧係数と呼ぶことにする。

$$C'_p = \frac{\sigma_p}{q_R} = \frac{\sigma_p}{\frac{1}{2}\rho U_R^2} \quad (5.1)$$

図 5.7 は、一様流を吹かせた場合の、ピトー管の高さの違いによる point1 から point6 の風圧係数の平均値を示したものである。ピトー管の高さが  $z=350\text{mm}$  のとき、point3 において、ピトー管の影響が大きく及んでいることが分かる。ピトー管の高さを  $z=400\text{mm}$  にした場合にも少し影響が及んでおり、高さを  $z=450\text{mm}$  にするとその影響は少なくなっていることが分かる。このように、point1 から point3 では、 $z=350\text{mm}$ 、 $400\text{mm}$  においてピトー管による影響が大きく出ていることが分かる。また、point4 から point6 を見ても、ピトー管の高さが  $z=450\text{mm}$ 、 $500\text{mm}$  のとき、比較的安定していることが分かる。

これらから、本章において掲載するデータはピトー管の高さが  $z=450\text{mm}$  の場合とする。また、ピトー管が他の高さの場合のデータは、付録に示した。

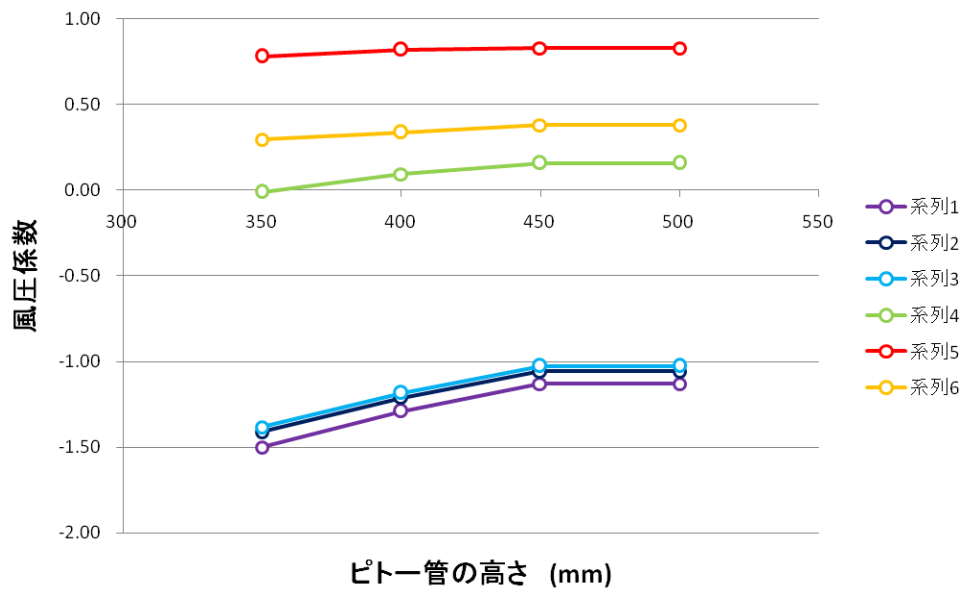


図 5.7 ピトー管の高さの違いによる平均風圧係数

まず、図 5.8 と図 5.9 に風向 0 度の一様流を吹かせた状態で、ピトー管で測定した風速と角度を付けて設置した模型の風圧係数の時刻歴変化を示す。ここでの風速とは、図 5.6 を参考に  $z=450\text{mm}$  に設置されているピトー管のデータを、基準として設定した point3 の高さである  $z=300\text{mm}$  の値に相当するよう、1.4 倍した数値を記したものである。そして、図 5.10 から図 5.15 に point1 から point6 の周波数におけるパワースペクトル密度を示す<sup>4)</sup>。ここでは、0.1Hz までの周波数成分のデータが有効になるように考え、5000 個のデータに対応する 4 秒間のパワースペクトルを 6 回平均したものを掲載する。

次に、図 5.16 から図 5.21 に模型の角度が 0 度、5 度、10 度、15 度のときのピトー管で測定した風速と風圧係数の時刻歴変化を示す。ここでは、これらのケースを case000, case000\_5, case000\_10, case000\_20 と呼ぶ。

そして、4 章で測定した風向変動のある気流を吹かせた状態で、水平に設置した模型の風圧係数の時刻歴変化を示す。図 5.22 から図 5.27 に case002, case002\_10, case002\_10c のピトー管で測定した風速と風圧係数の時刻歴変化を記す。ただし、case002, case002\_10, case002\_10c の風速も、図 5.6 を参考に  $z=450\text{mm}$  に設置されているピトー管のデータを基準として設定した point3 の高さである  $z=300\text{mm}$  の値に相当するよう、1.4 倍した数値を記したものである。

最後に、図 5.28 から図 5.35 に case002A, case002A\_10, case002B, case002B\_10 の、ピトー管で測定した風速と角度を付けて設置した模型の風圧係数の時刻歴変化を記す。case002A, case002A\_10, case002B, case002B\_10 は、高さ方向の変化が複雑なので、 $z=450\text{mm}$  のピトー管のデータを参考としてそのまま記した。そして、図 5.36 から図 5.71 に case002A 及び case002A\_10 における point ごとの周波数におけるパワースペクトル密度を示した。ここでは、8 秒間のパワースペクトルを 4 回平均したものを掲載する。ただし、case002A の変化中の値については、変化時間が 2 秒間であるため、2 秒間のパワースペクトルを 4 回平均したものを掲載した。その後、比較のため、図 5.72 から図 5.75 に case002B の変化前・変化中・変化後を載せ、さらに case002B\_10 の変化中の値を記した。ここでも、case002B の変化中の値については、変化時間が 2 秒間であるため、2 秒間のパワースペクトルを 4 回平均したものを掲載した。

## 5. 4 実験結果

### (1) 一様流の場合

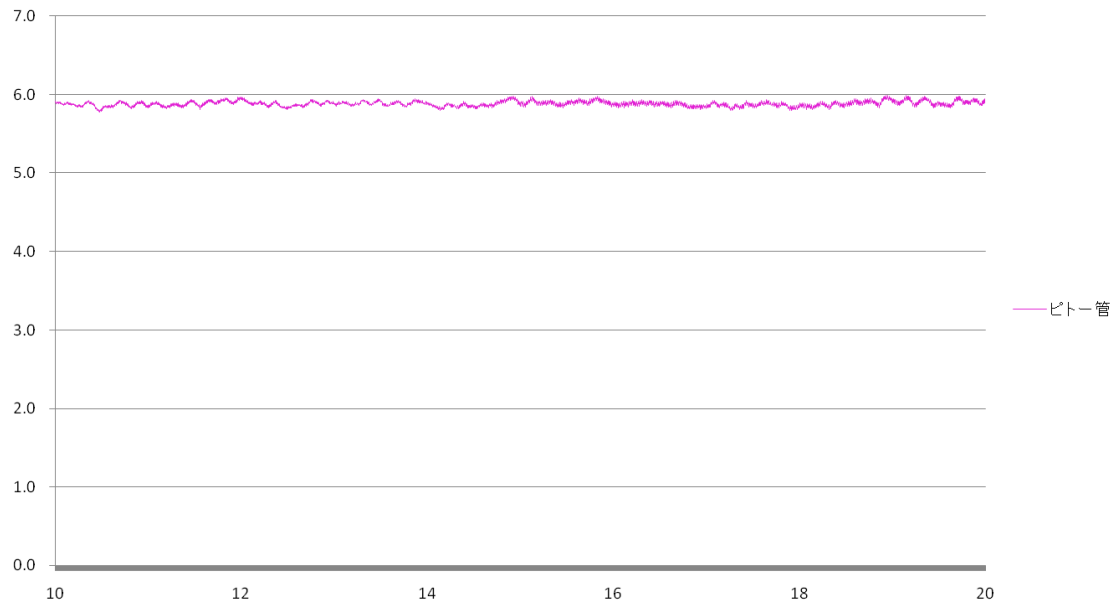


図 5.8 pitot450\_case000 ピトー管の風速の時刻歴変化

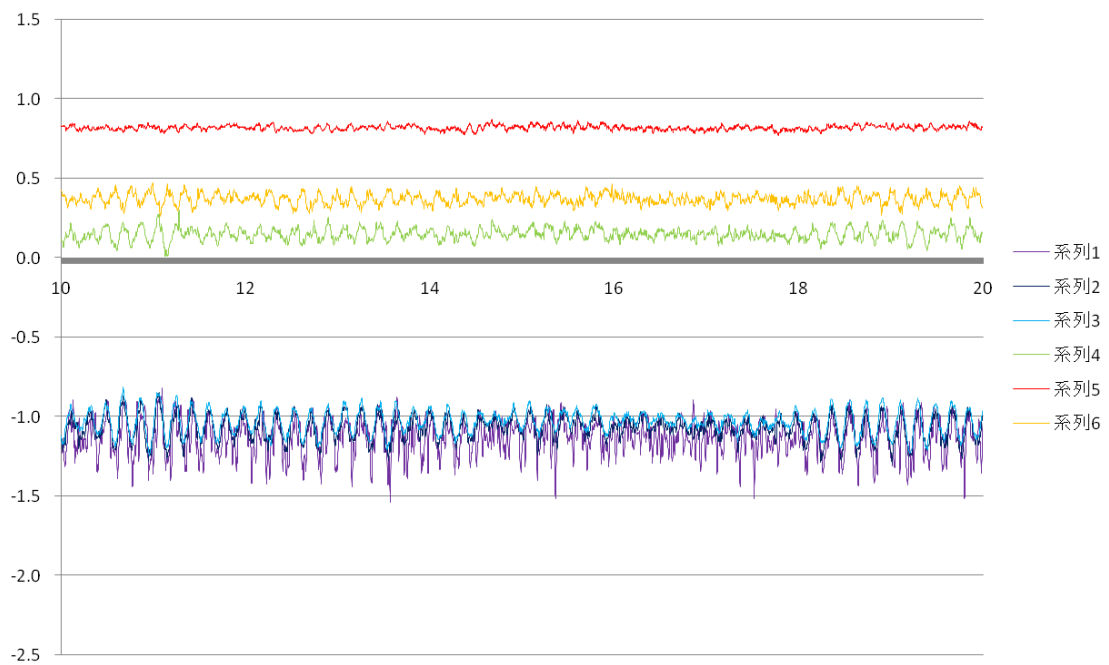


図 5.9 pitot450\_case000 模型の風圧係数の時刻歴変化

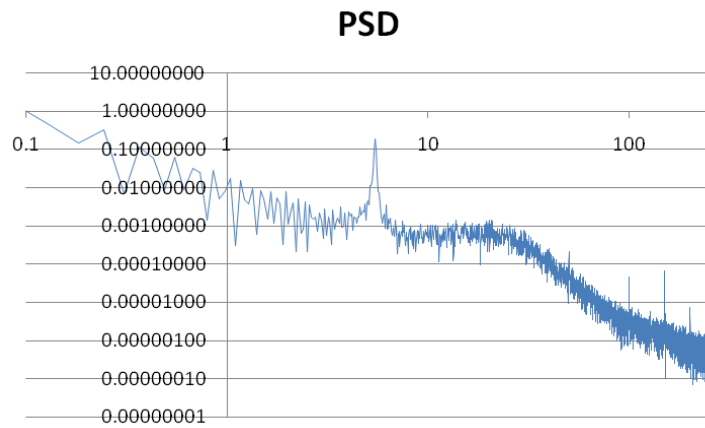


図 5.10 case000 パワースペクトル密度 (point1)

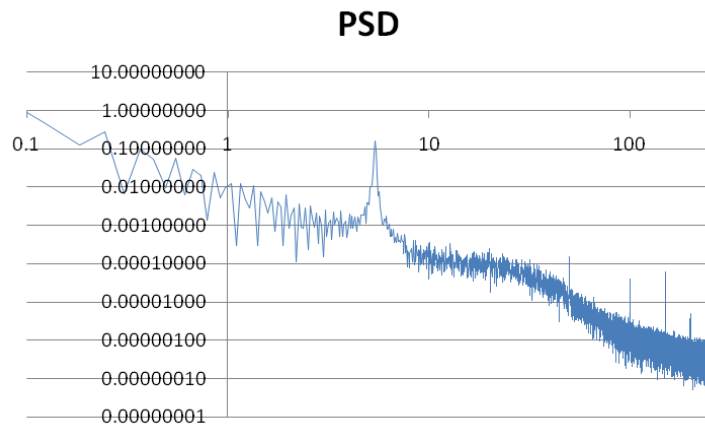


図 5.11 case000 パワースペクトル密度 (point2)

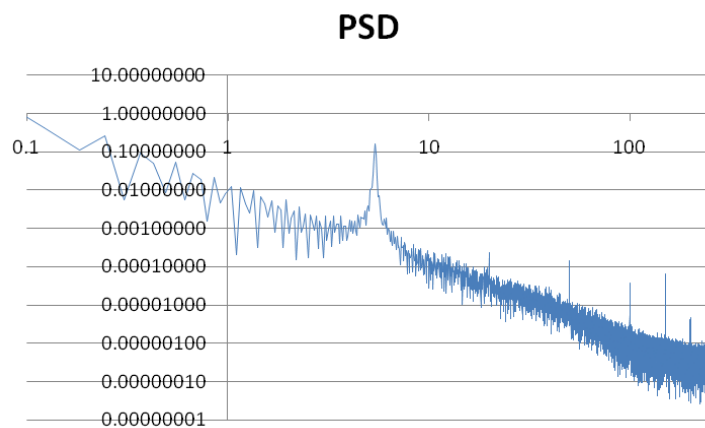


図 5.12 case000 パワースペクトル密度 (point3)

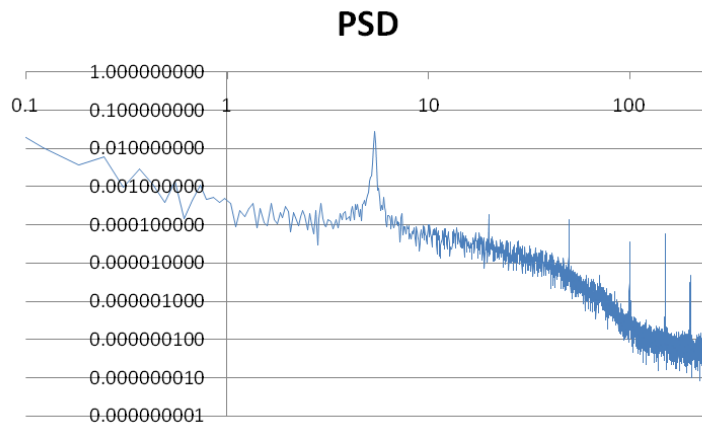


図 5.13 case000 パワースペクトル密度 (point4)

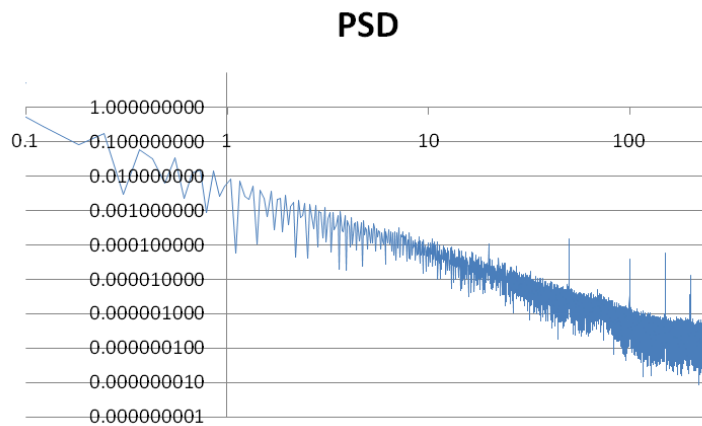


図 5.14 case000 パワースペクトル密度 (point5)

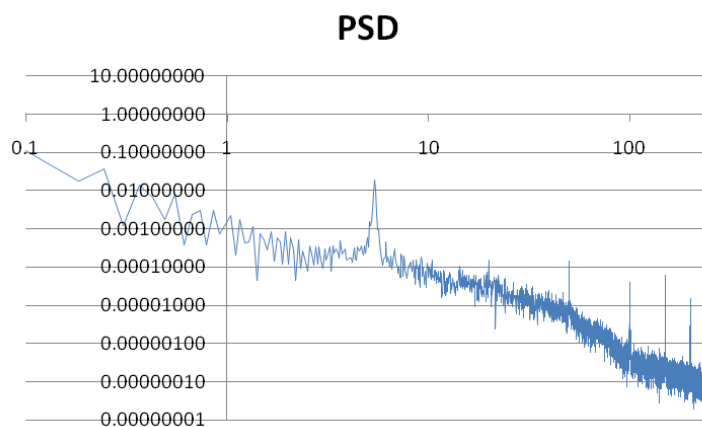


図 5.15 case000 パワースペクトル密度 (point6)

(2) 一様流に傾けた模型を置いた場合

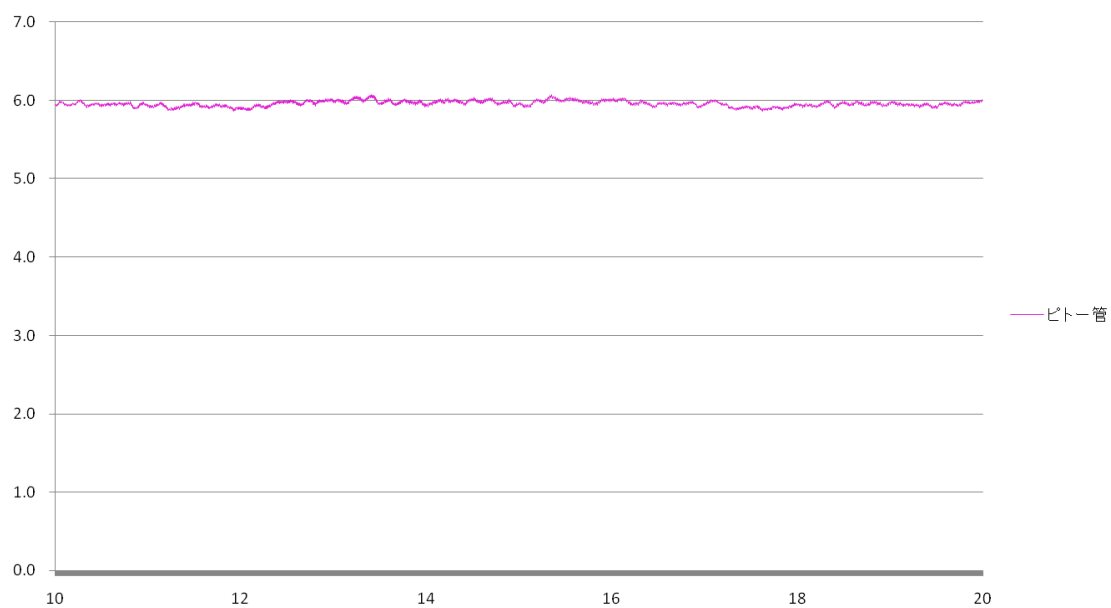


図 5.16 pitot450\_case000\_5 ピトー管の風速の時刻歴変化

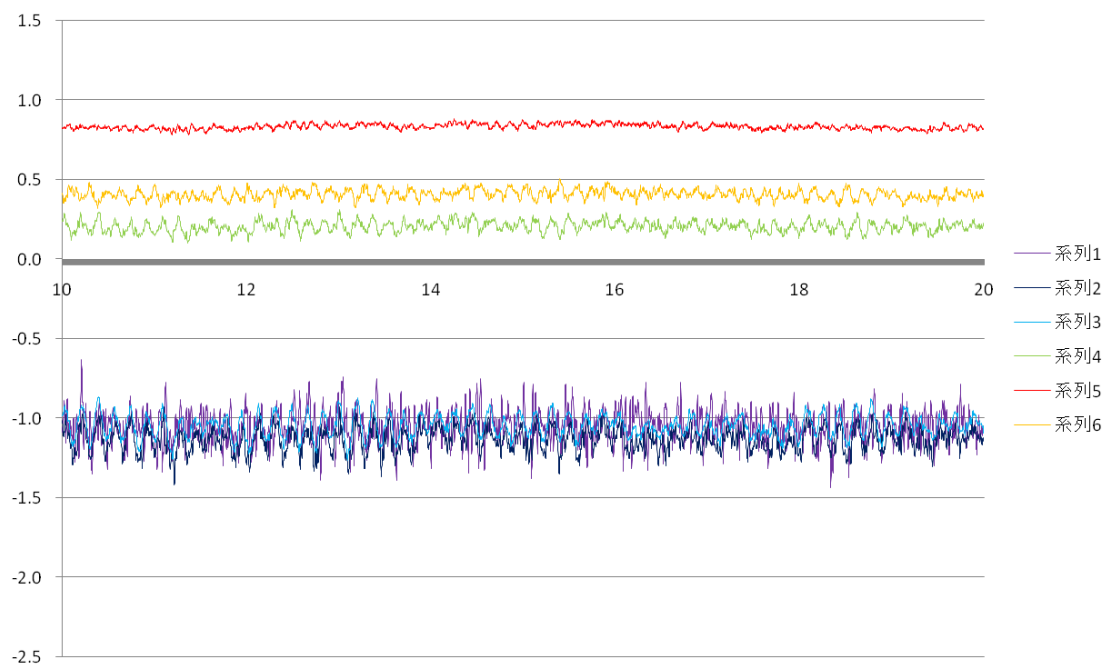


図 5.17 pitot450\_case000\_5 ピトー管の風速の時刻歴変化

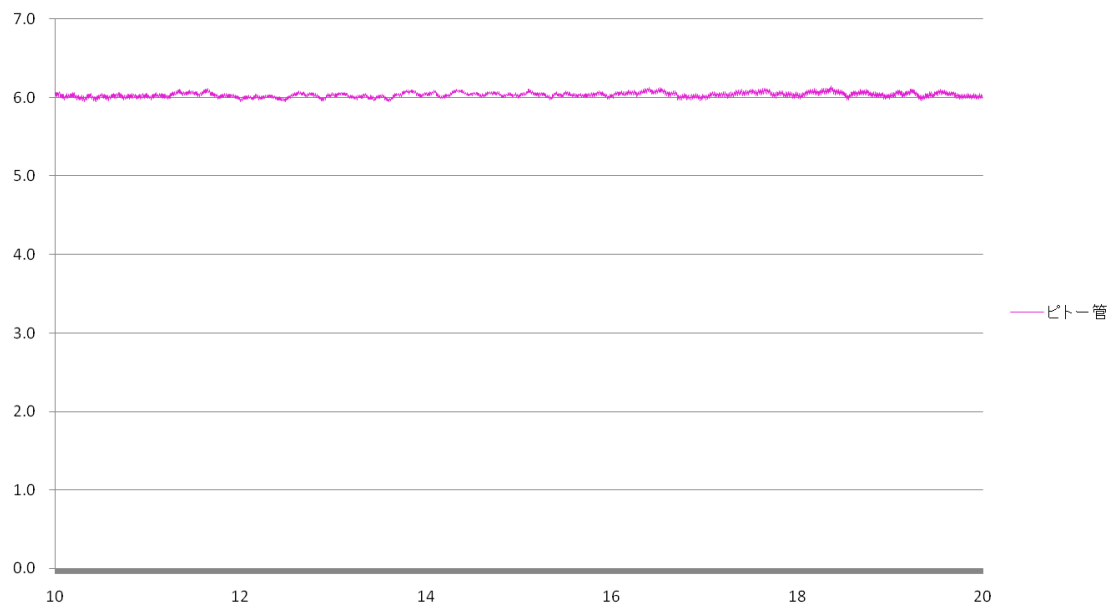


図 5.18 pitot450\_case000\_10 ピトー管の風速の時刻歴変化

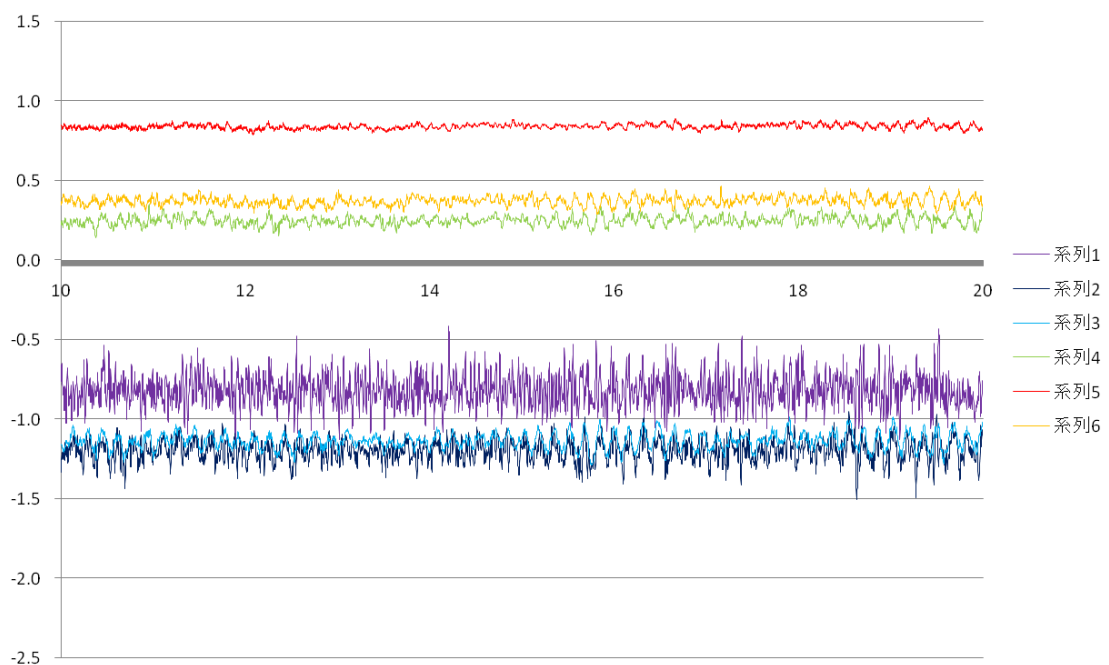


図 5.19 pitot450\_case000\_10 模型の風圧係数の時刻歴変化



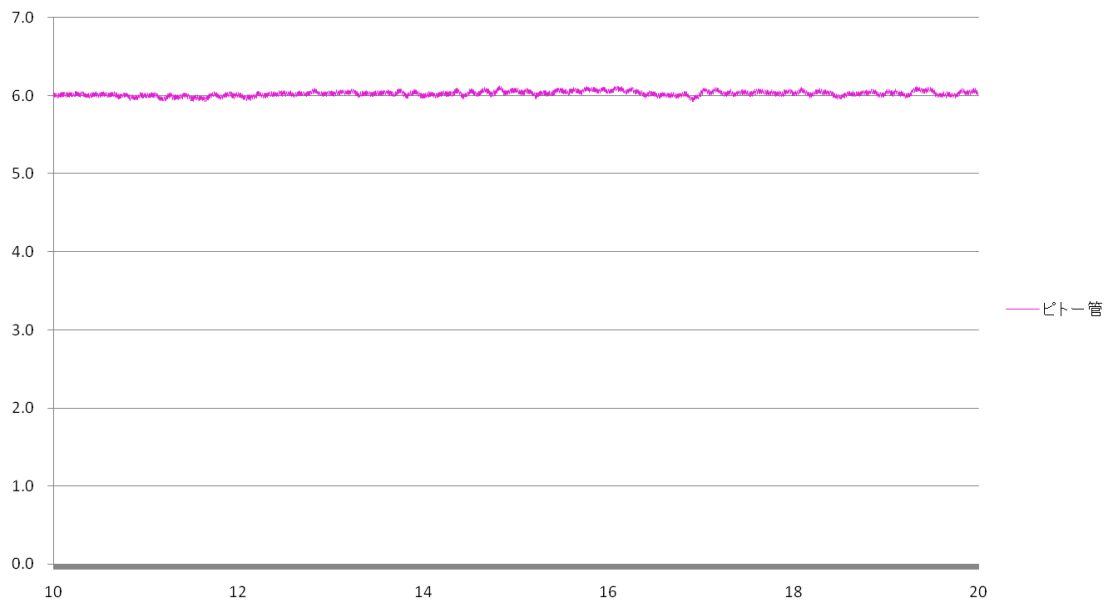


図 5.20 pitot450\_case000\_15 ピトー管の風速の時刻歴変化

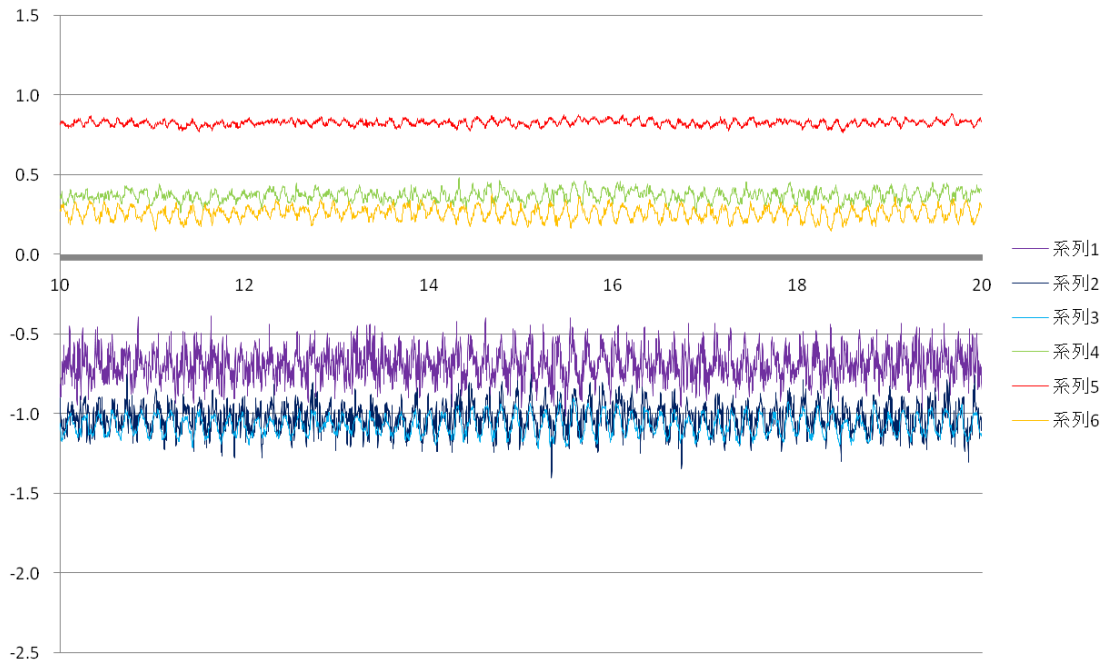


図 5.21 pitot450\_case000\_15 模型の風圧係数の時刻歴変化

### (3) 風向変化のある風に模型を置いた場合

風圧測定機器の関係上、変化開始時刻を 10 秒とする。

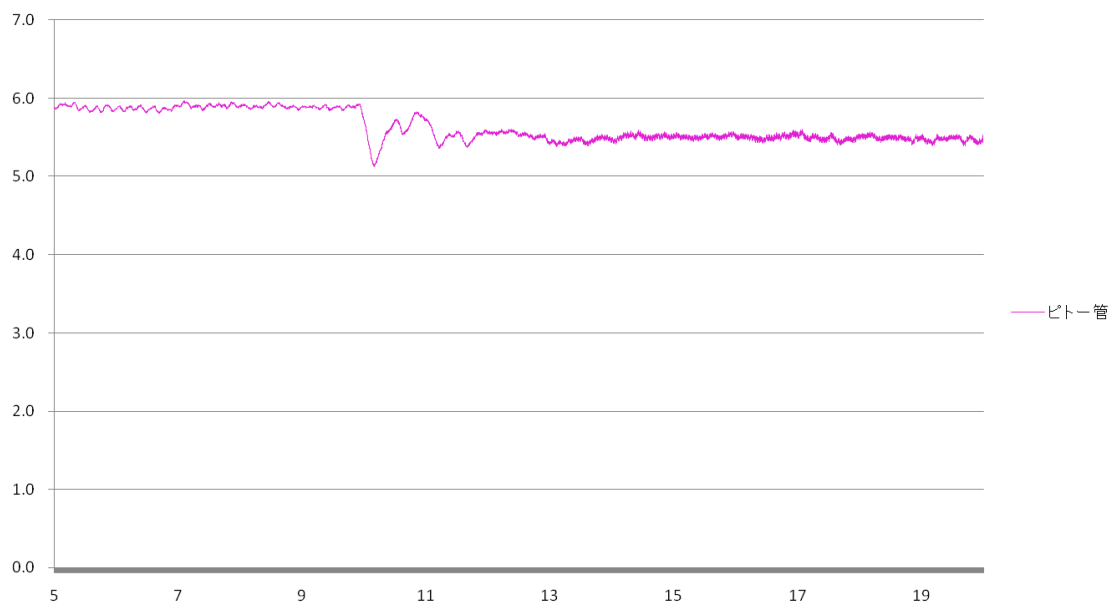


図 5.22 pitot450\_case002 ピトー管の風速の時刻歴変化

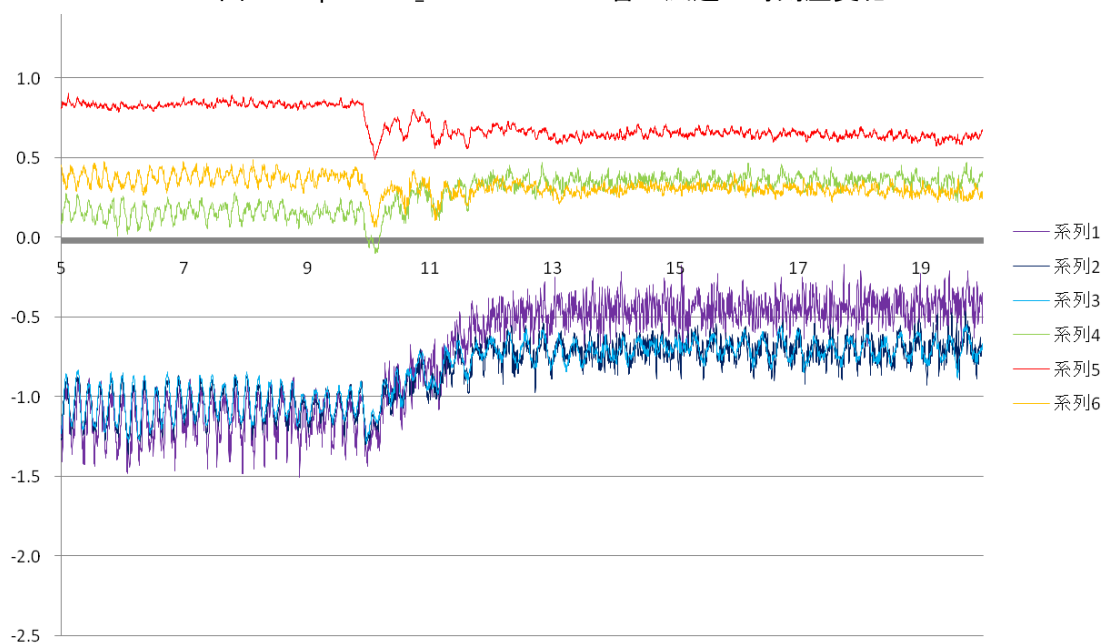


図 5.23 pitot450\_case002 模型の風圧係数の時刻歴変化

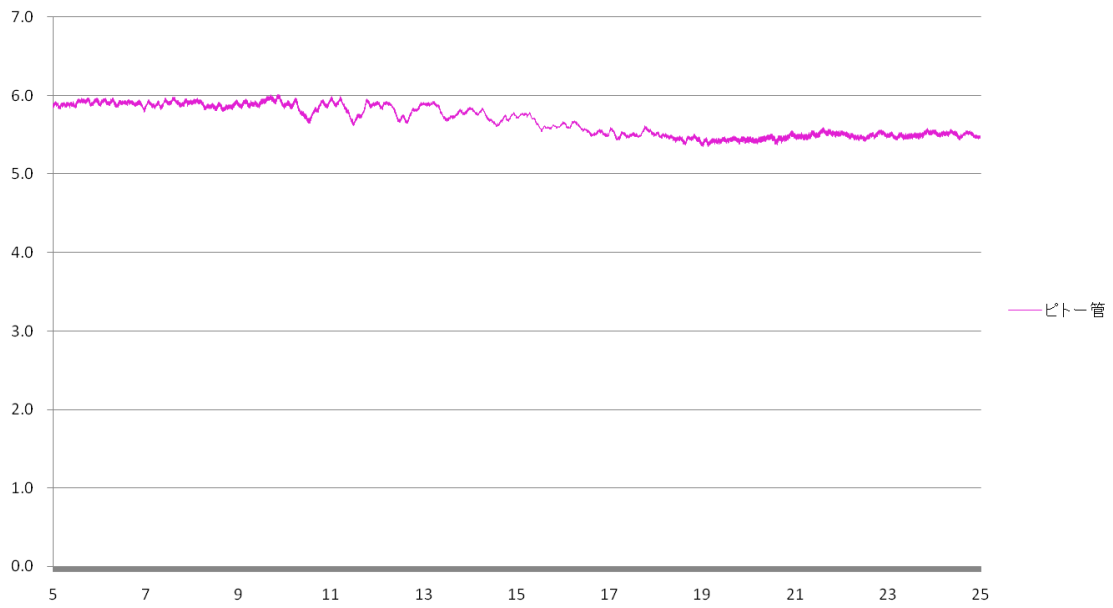


図 5.24 pitot450\_case002\_10 ピトー管の風速の時刻歴変化

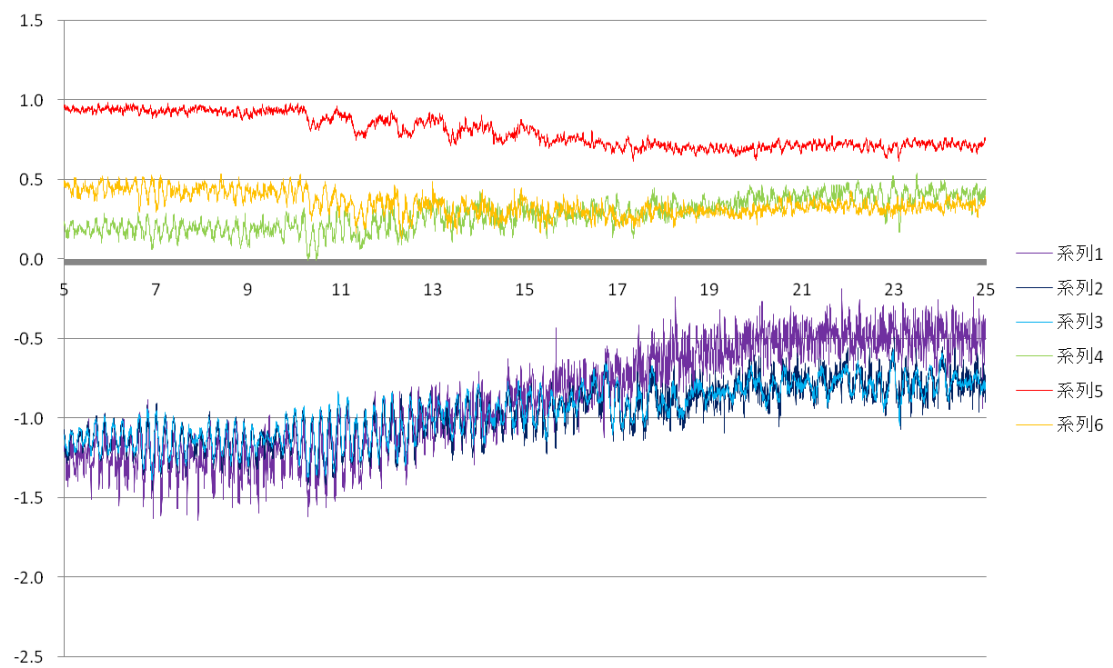


図 5.25 pitot450\_case002\_10 模型の風圧係数の時刻歴変化

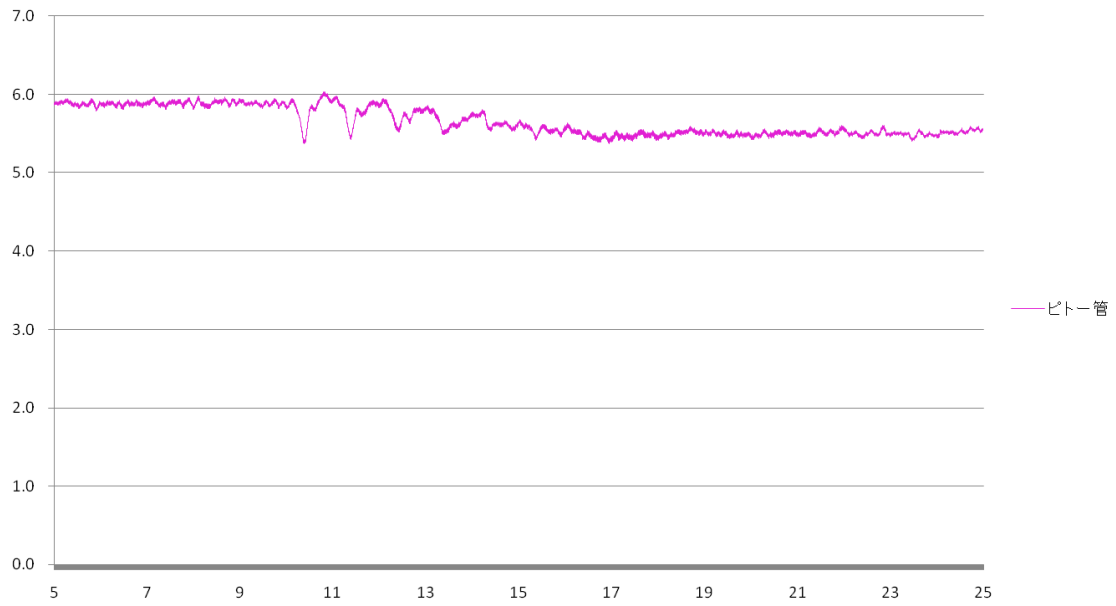


図 5.26 pitot450\_case002\_10c ピトー管の風速の時刻歴変化

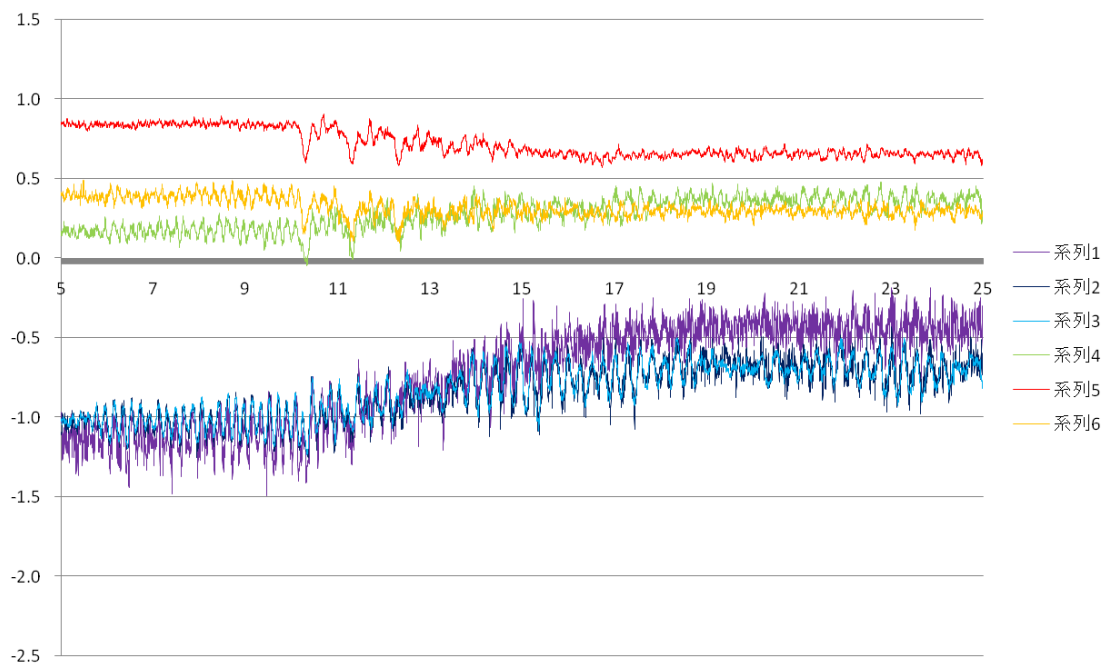


図 5.27 pitot450\_case002\_10c 模型の風圧係数の時刻歴変化

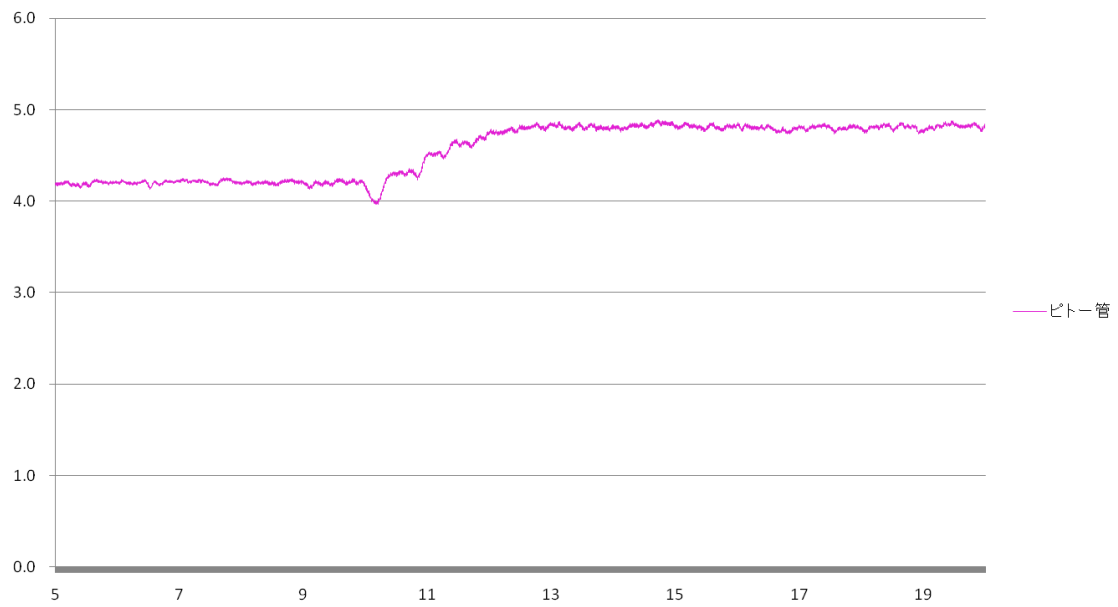


図 5.28 pitot450\_case002A ピトー管の時刻歴変化(z=450)

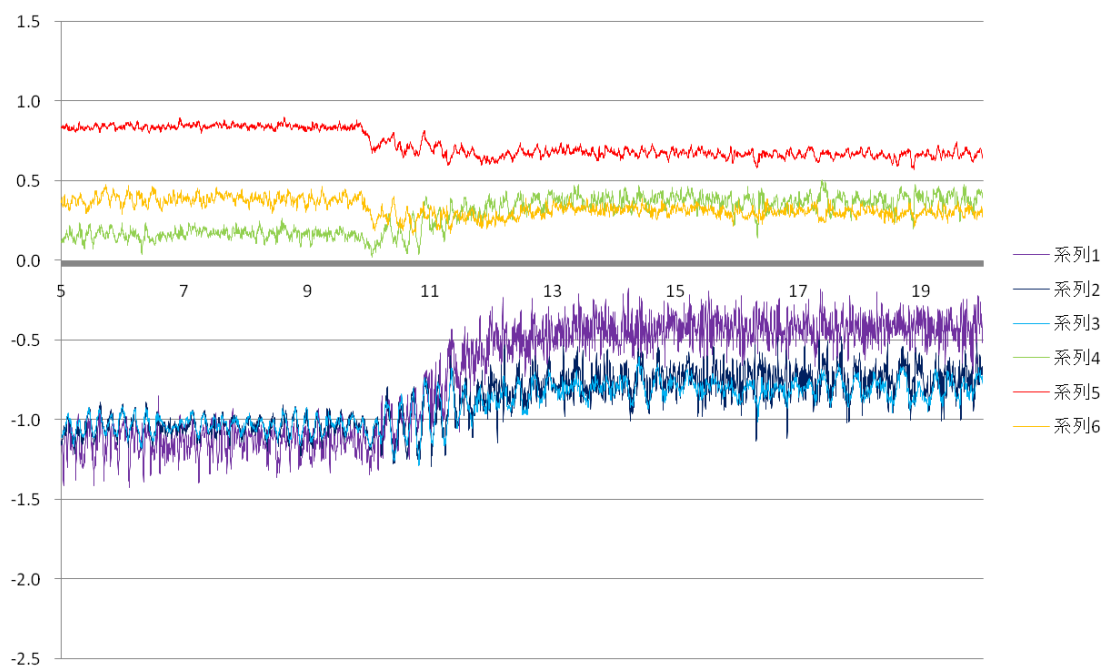


図 5.29 pitot450\_case002A 模型の風圧係数の時刻歴変化

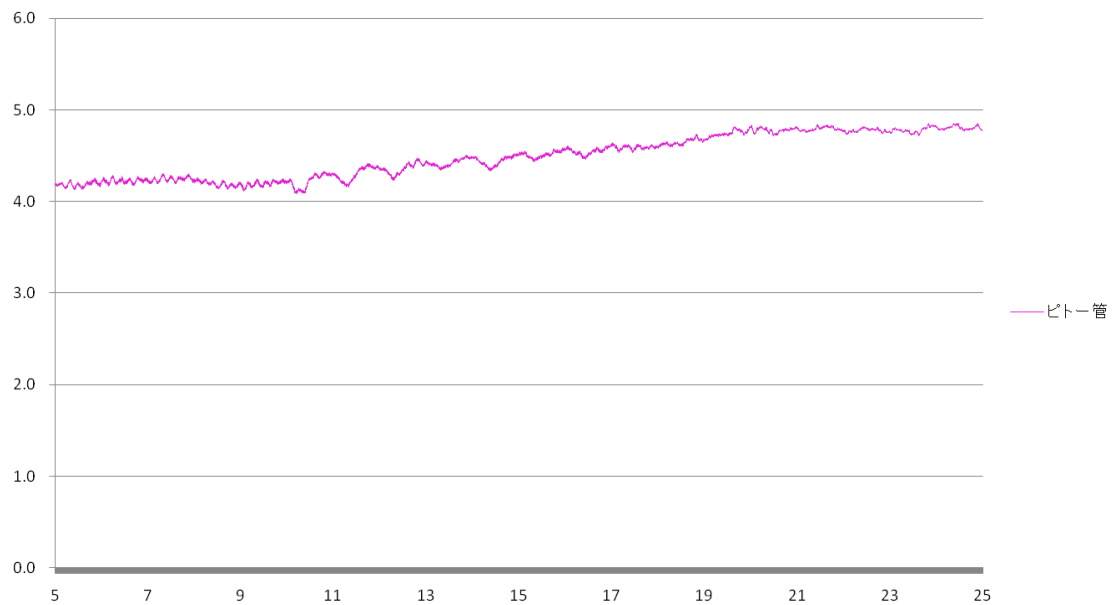


図 5.30 pitot450\_case002A\_10 ピトー管の風速の時刻歴変化(z=450)

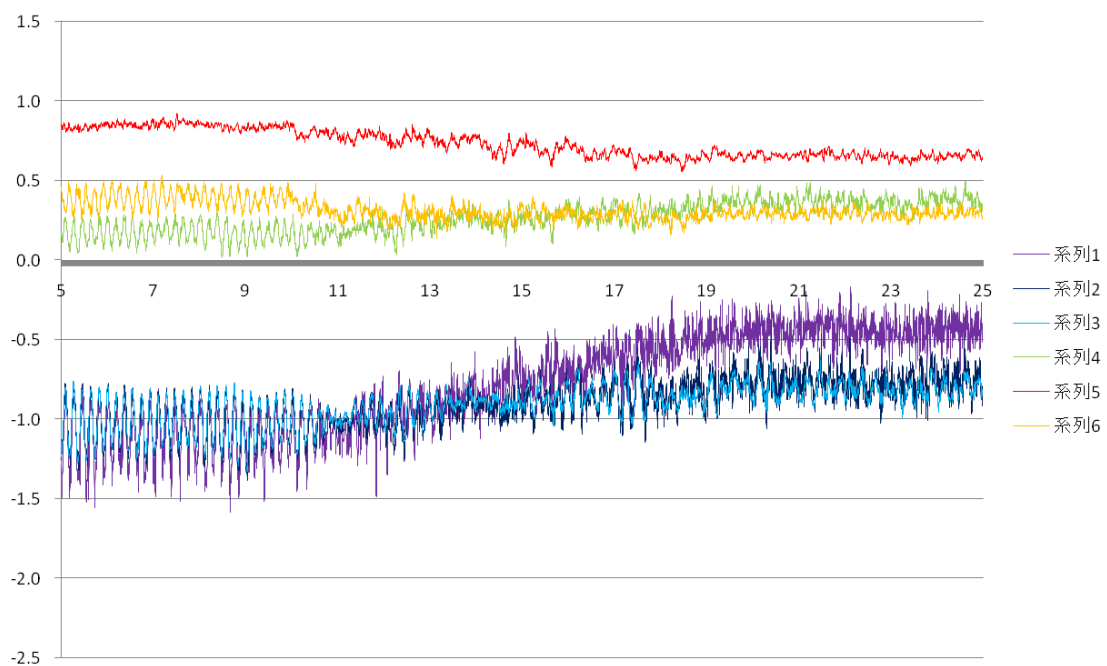


図 5.31 pitot450\_case002A\_10 模型の風圧係数の時刻歴変化

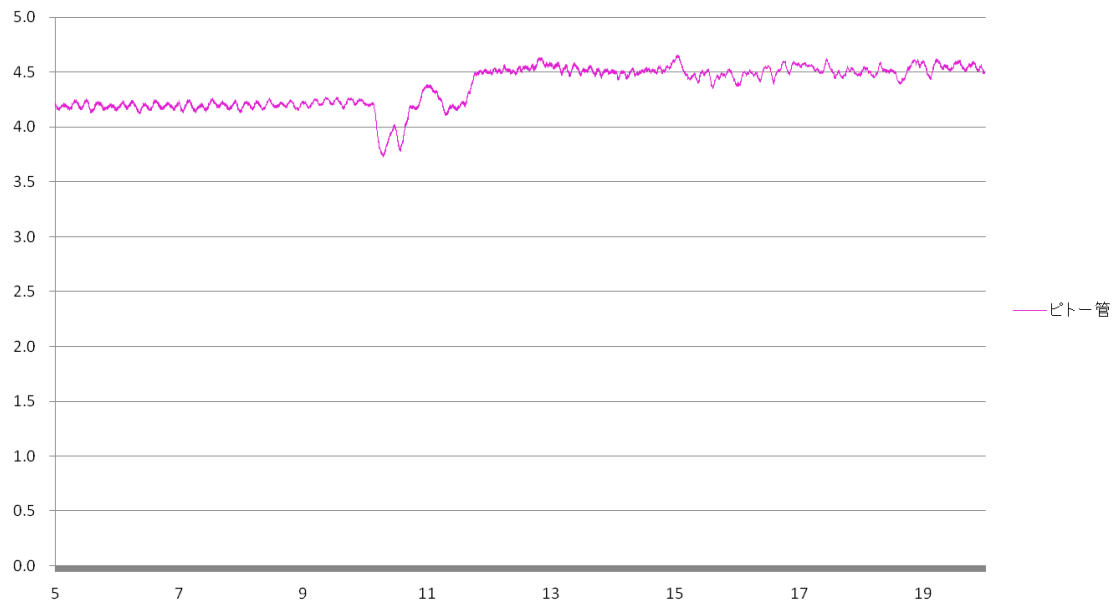


図 5.32 pitot450\_case002B ピトー管の時刻歴変化(z=450)

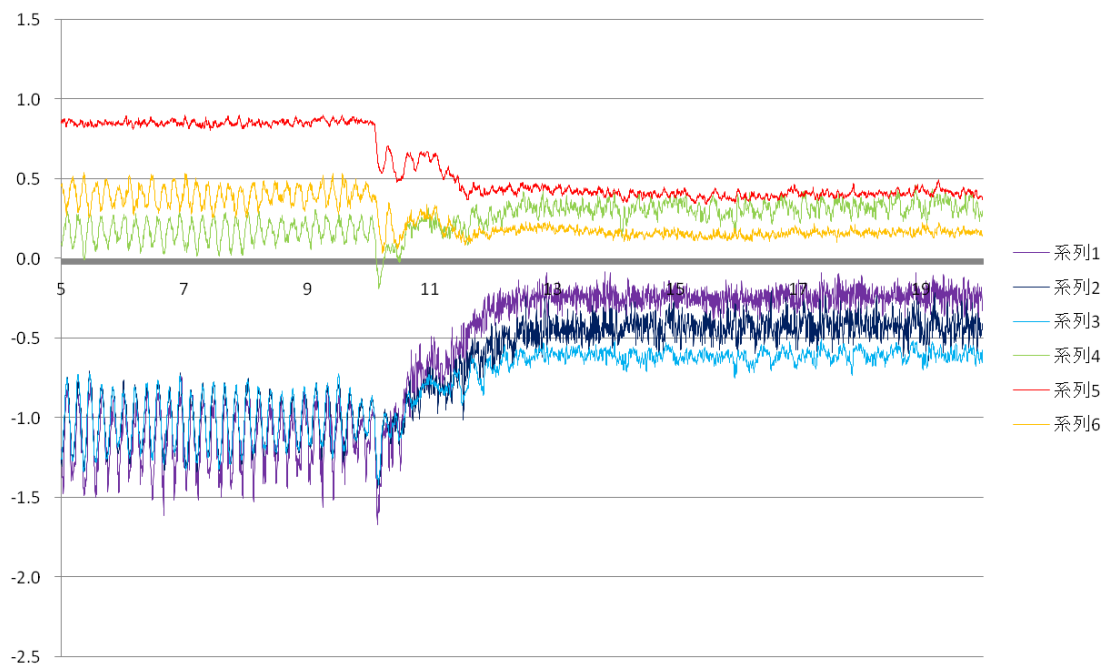


図 5.33 pitot450\_case002B 模型の風圧係数の時刻歴変化

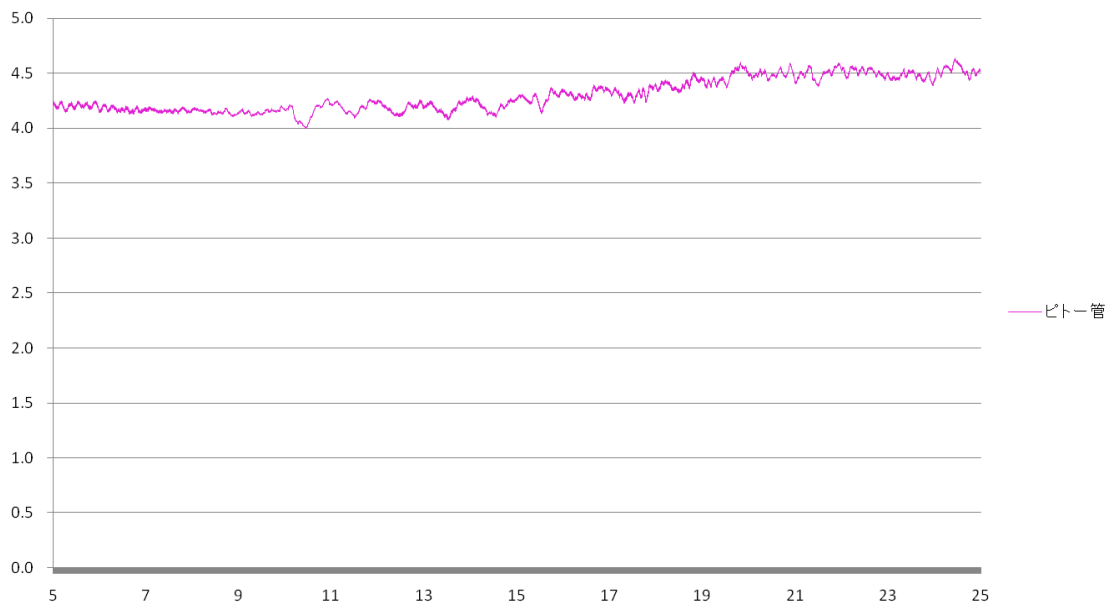


図 5.34 pitot450\_case002B\_10 ピトー管の風速の時刻歴変化( $z=450$ )

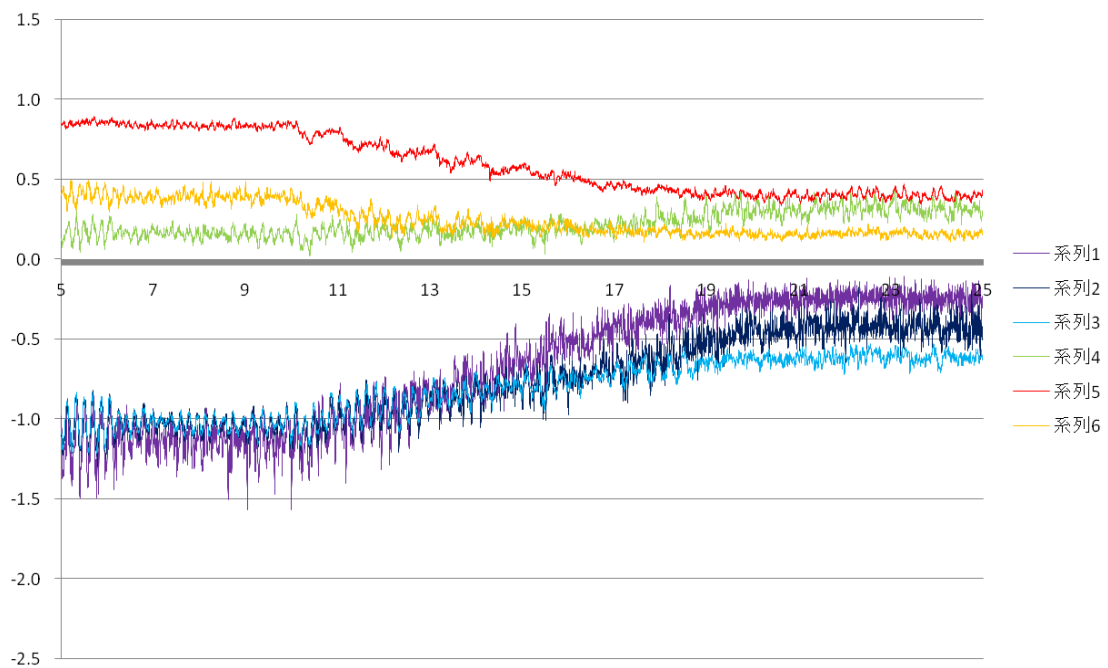


図 5.35 pitot450\_case002B\_10 模型の風圧係数の時刻歴変化



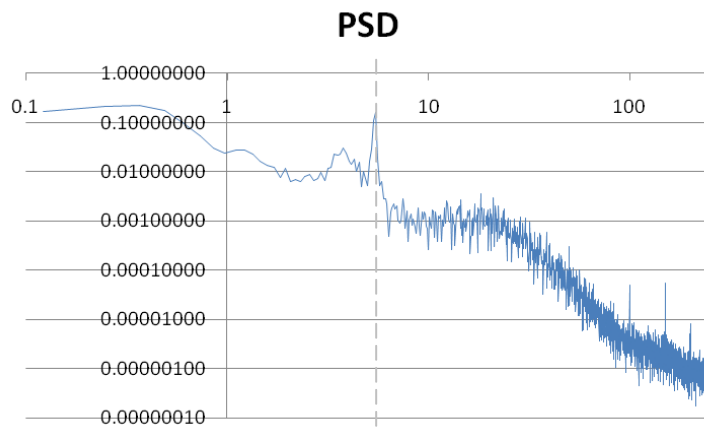


図 5.36 case002A パワースペクトル密度 (point1 変化前)

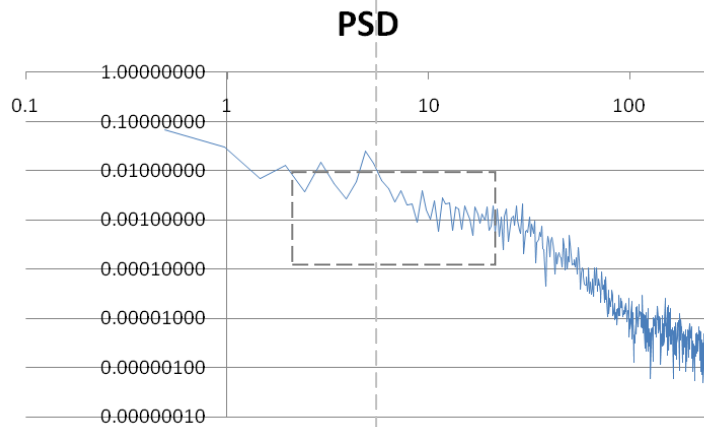


図 5.37 case002A パワースペクトル密度 (point1 変化中)

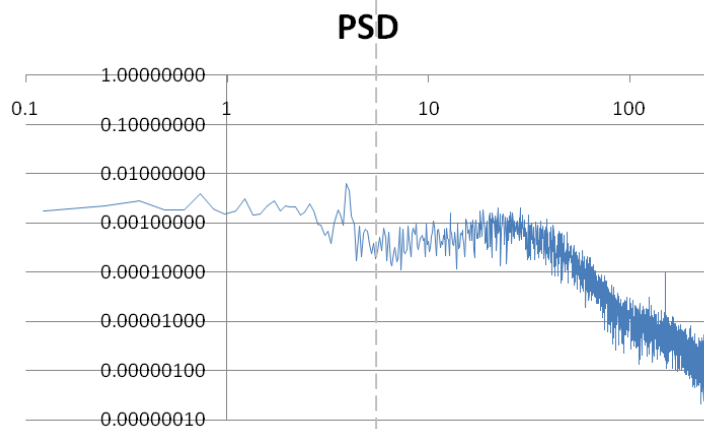


図 5.38 case002A パワースペクトル密度 (point1 変化後)

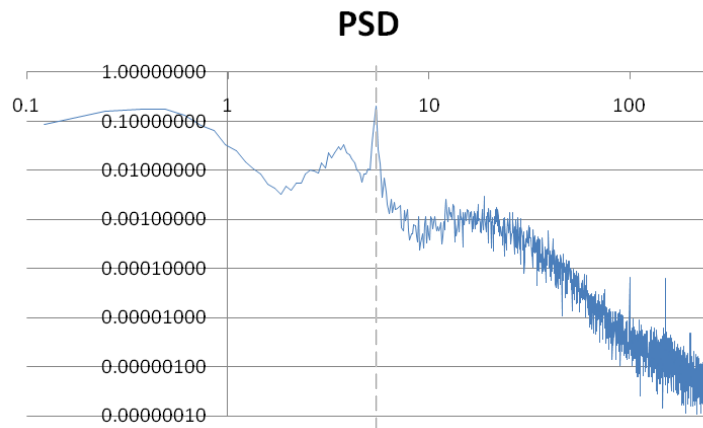


図 5.39 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point1 変化前)

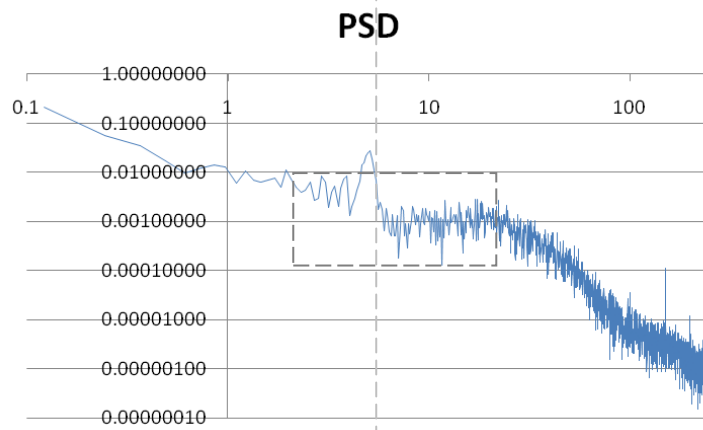


図 5.40 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point1 変化中)

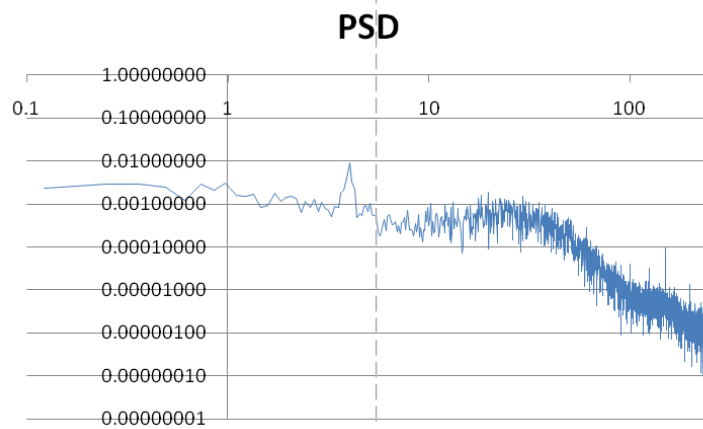


図 5.41 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point1 変化後)

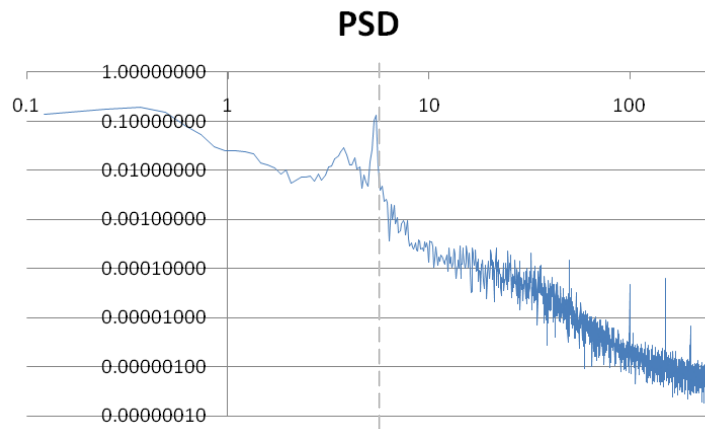


図 5.42 case002A パワースペクトル密度 (point2 変化前)

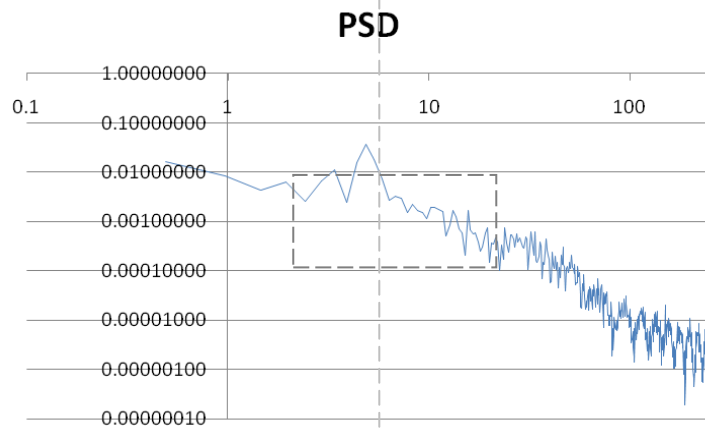


図 5.43 case002A パワースペクトル密度 (point2 変化中)

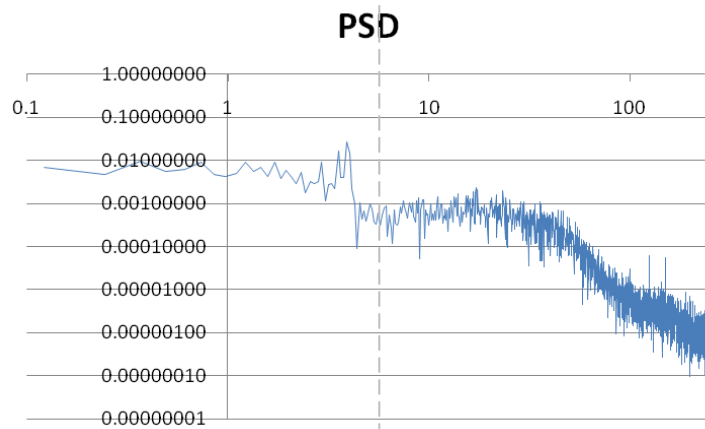


図 5.44 case002A パワースペクトル密度 (point2 変化後)

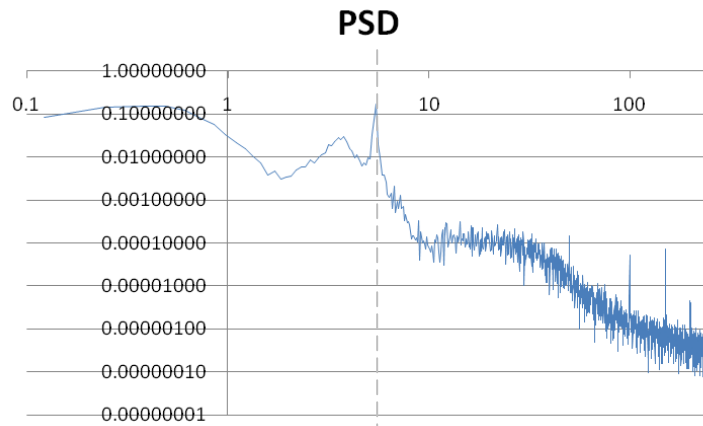


図 5.45 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point2 変化前)

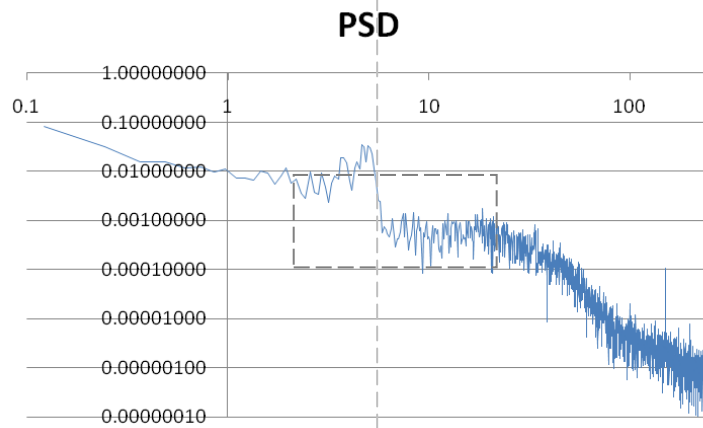


図 5.46 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point2 変化中)

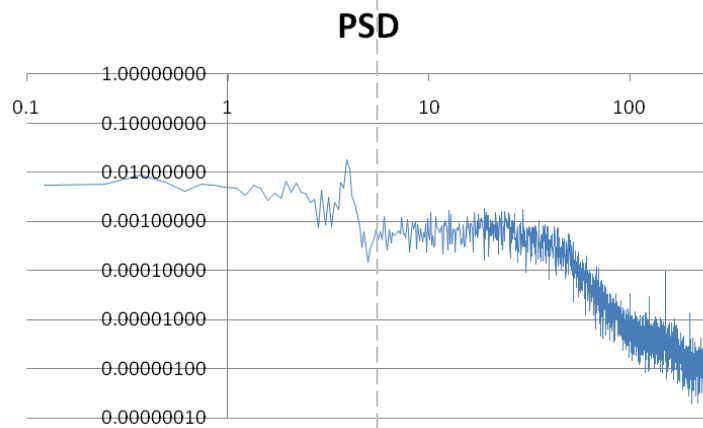


図 5.47 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point2 変化後)

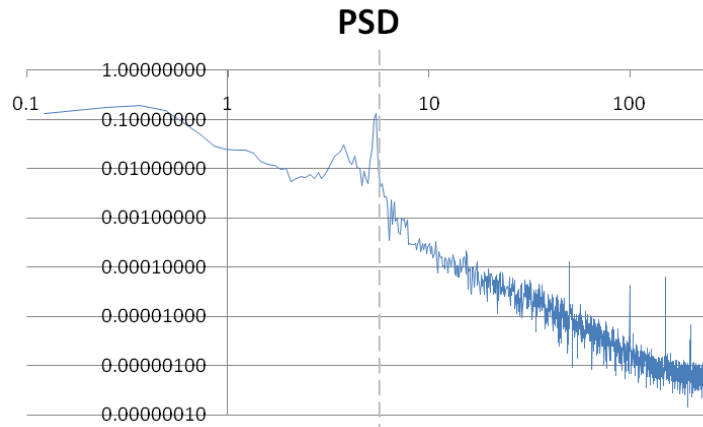


図 5.48 case002A パワースペクトル密度 (point3 変化前)

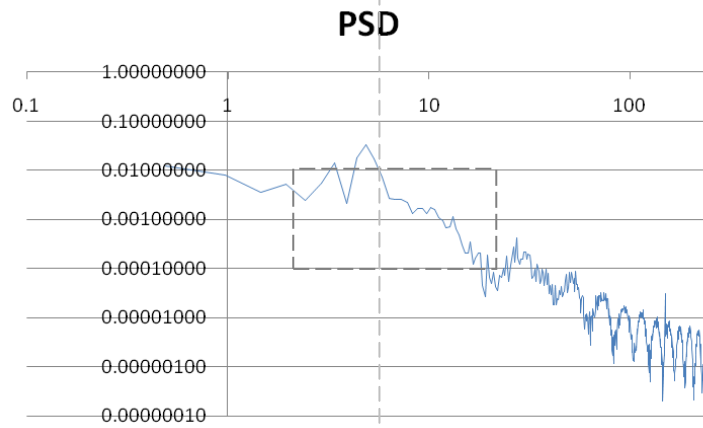


図 5.49 case002A パワースペクトル密度 (point3 変化中)

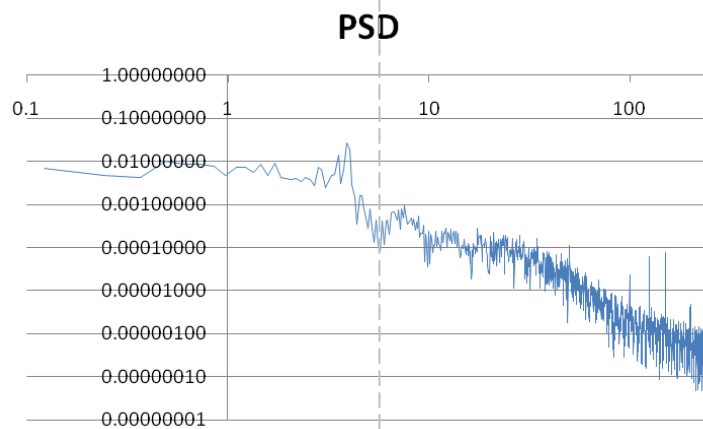


図 5.50 case002A パワースペクトル密度 (point3 変化後)

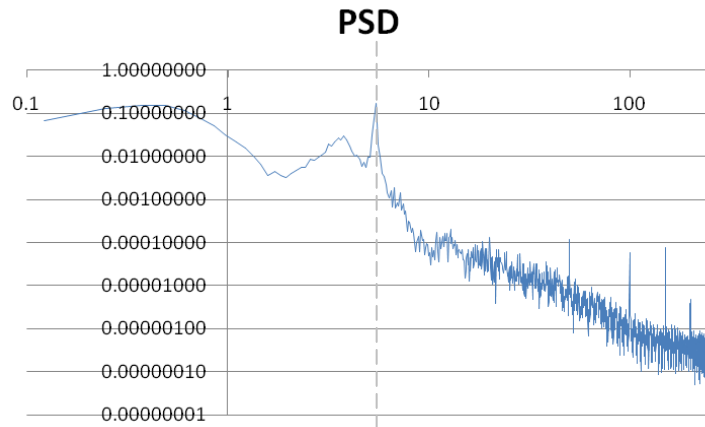


図 5.51 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point3 変化前)

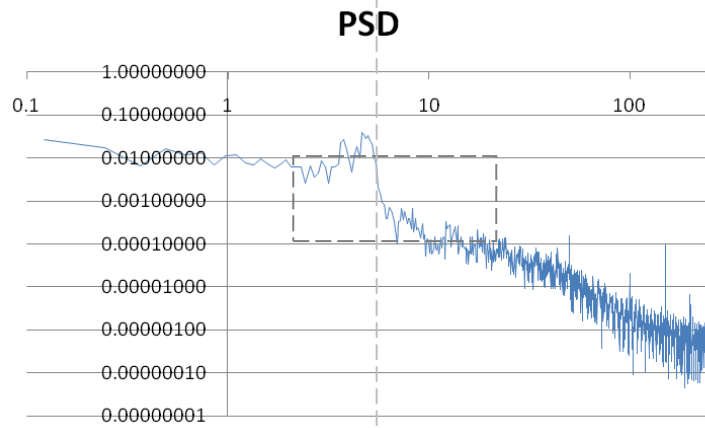


図 5.52 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point3 変化中)

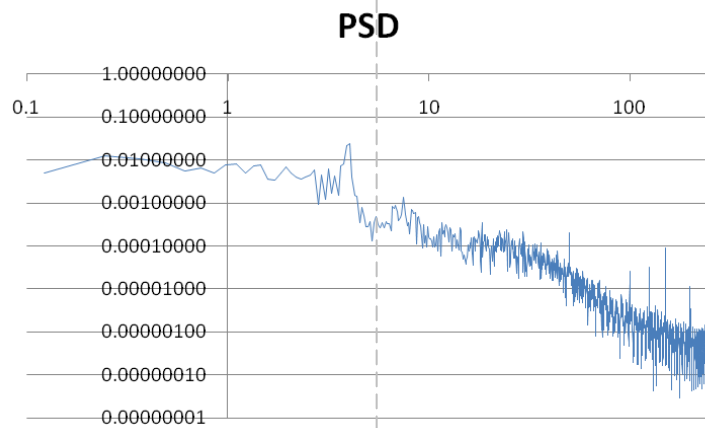


図 5.53 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point3 変化後)

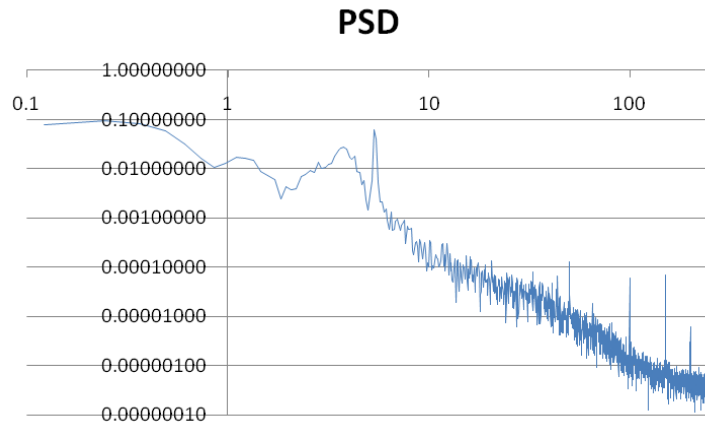


図 5.54 case002A パワースペクトル密度 (point4 変化前)

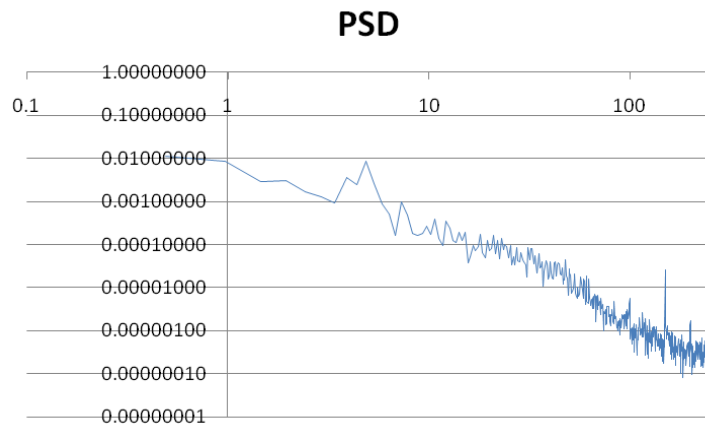


図 5.55 case002A パワースペクトル密度 (point4 変化中)

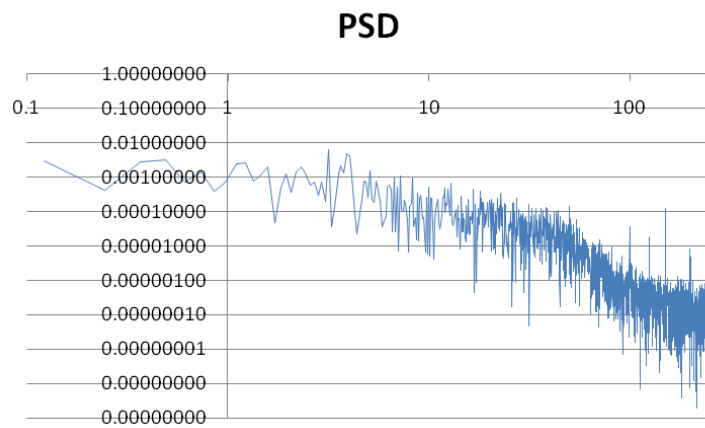


図 5.56 case002A パワースペクトル密度 (point4 変化後)

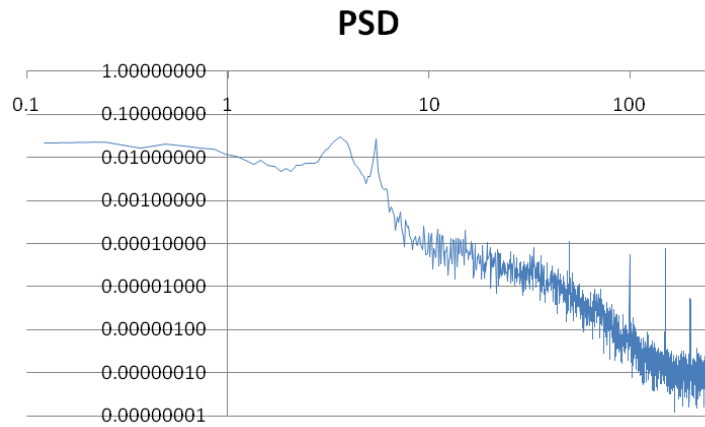


図 5.57 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point4 変化前)

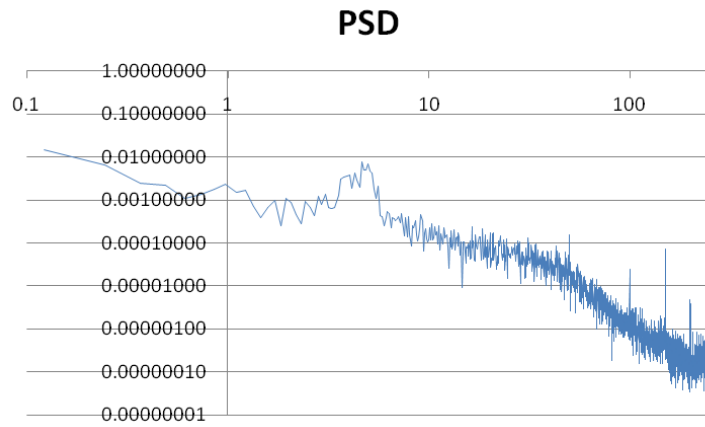


図 5.58 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point4 変化中)

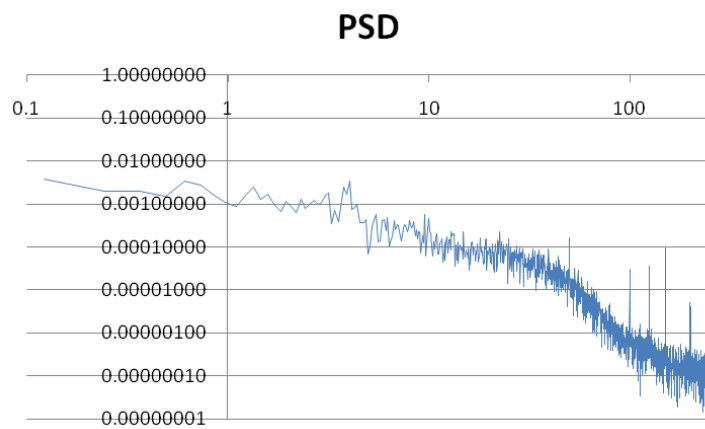


図 5.59 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point4 変化後)



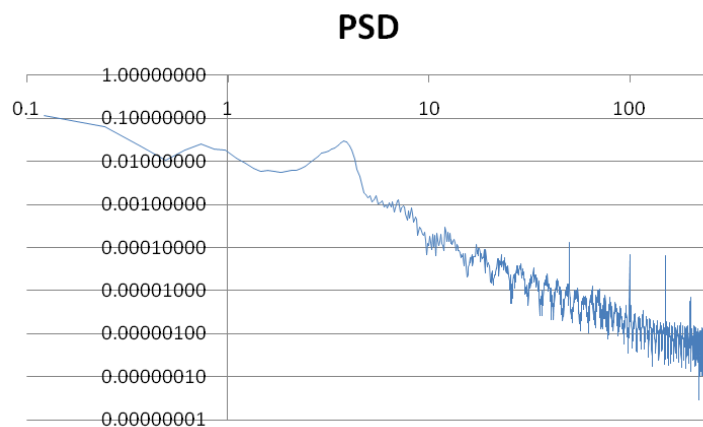


図 5.60 case002A パワースペクトル密度 (point5 変化前)

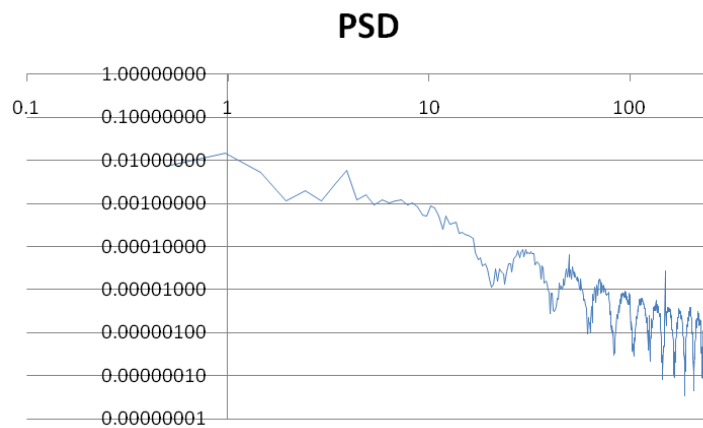


図 5.61 case002A パワースペクトル密度 (point5 変化中)

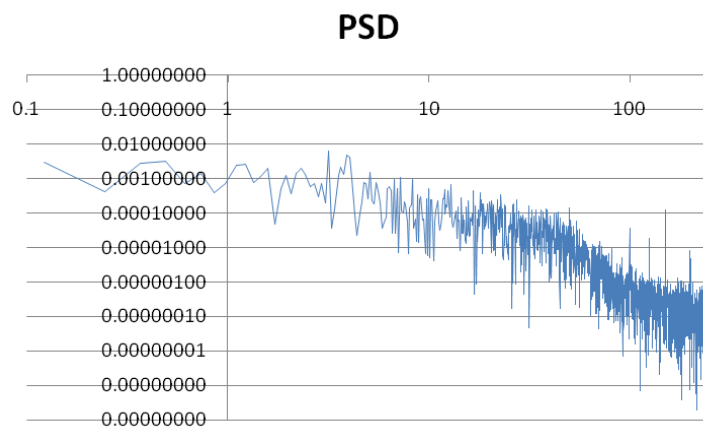


図 5.62 case002A パワースペクトル密度 (point5 変化後)

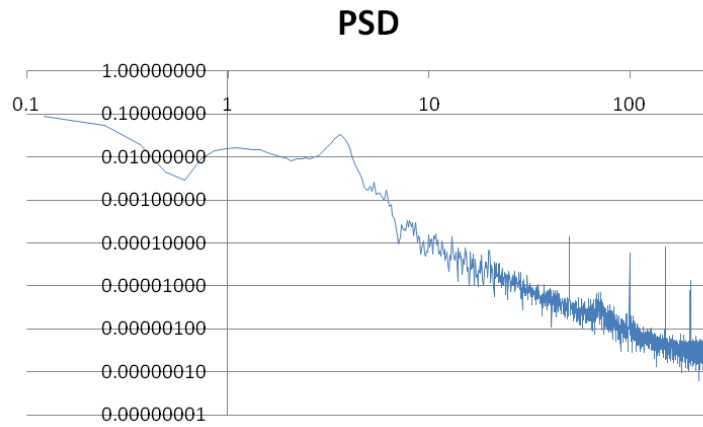


図 5.63 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point5 変化前)

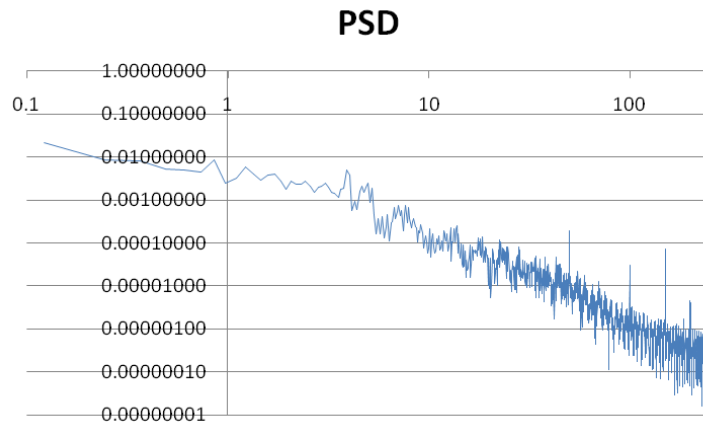


図 5.64 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point5 変化中)

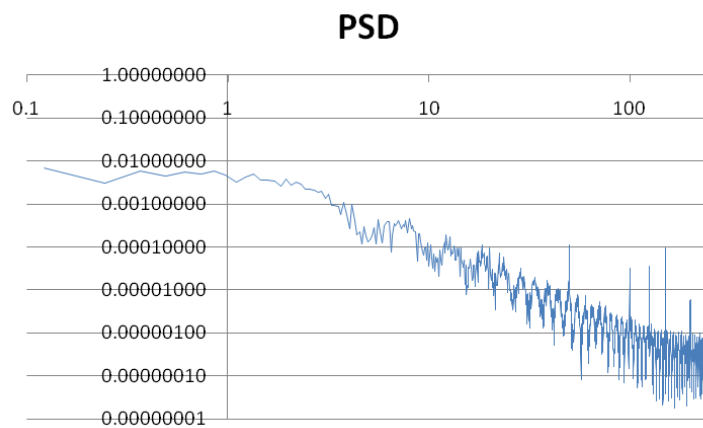


図 5.65 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point5 変化後)

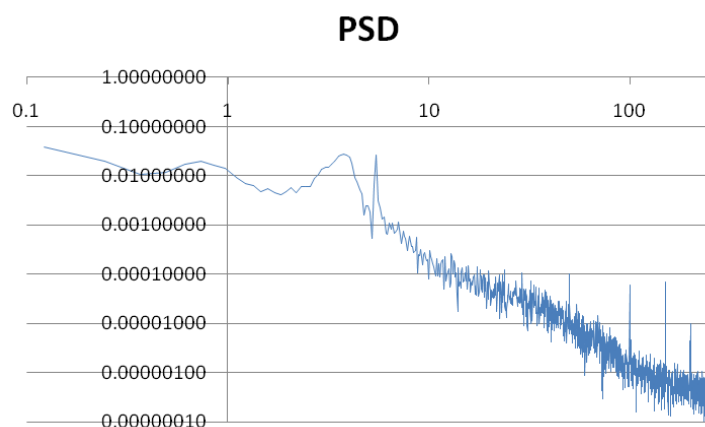


図 5.66 case002A パワースペクトル密度 (point6 変化前)

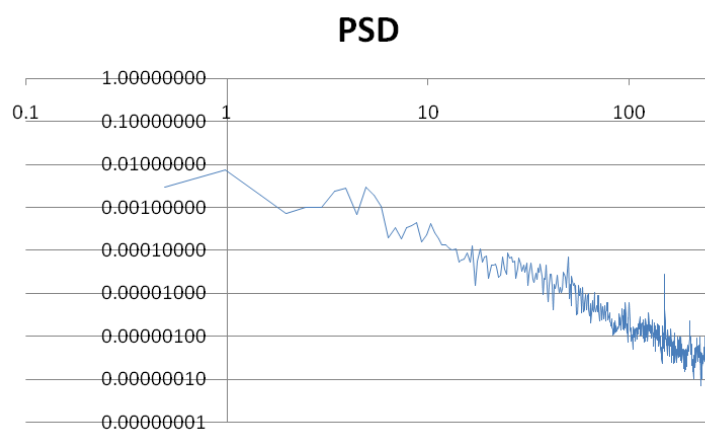


図 5.67 case002A パワースペクトル密度 (point6 変化中)

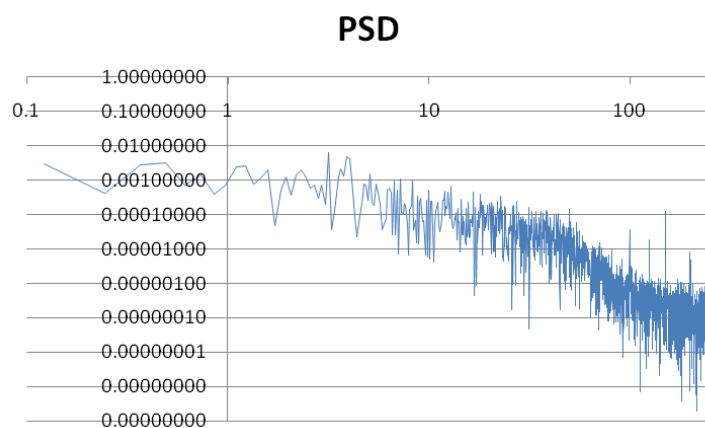


図 5.68 case002A パワースペクトル密度 (point6 変化後)

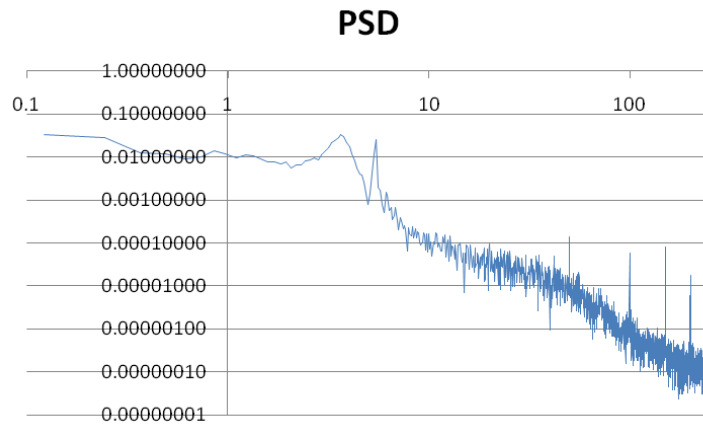


図 5.69 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point6 変化前)

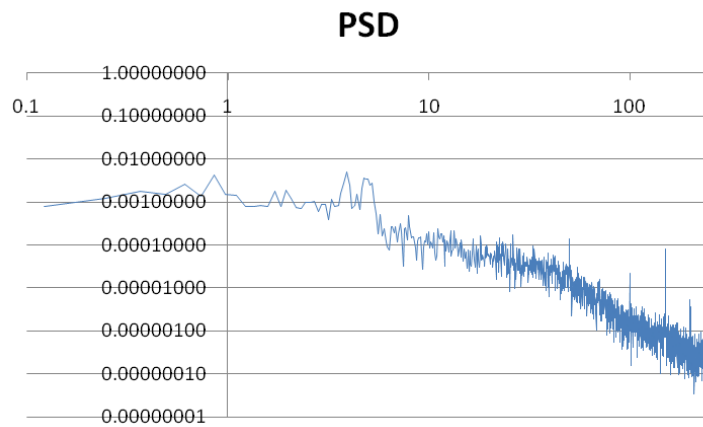


図 5.70 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point6 変化中)

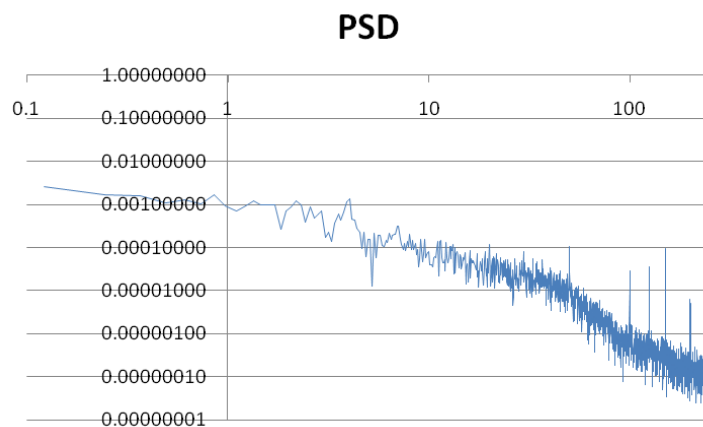


図 5.71 case002A\_10 パワースペクトル密度 (point6 変化後)

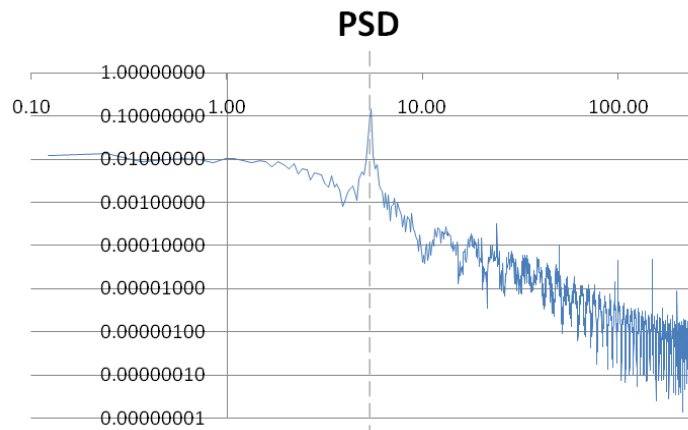


図 5.72 case002B パワースペクトル密度 (point3 変化前)

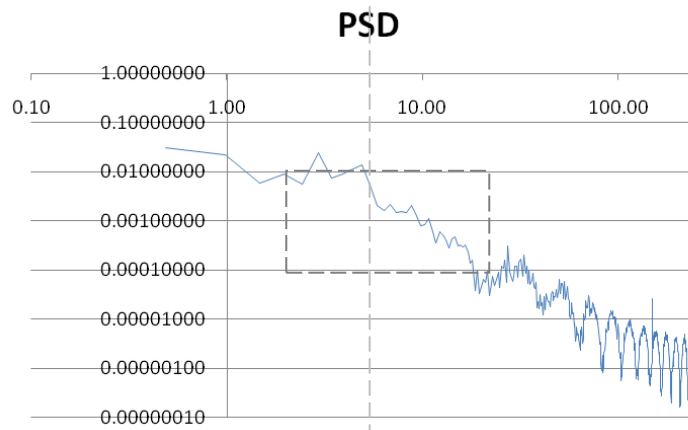


図 5.73 case002B パワースペクトル密度 (point3 変化中)

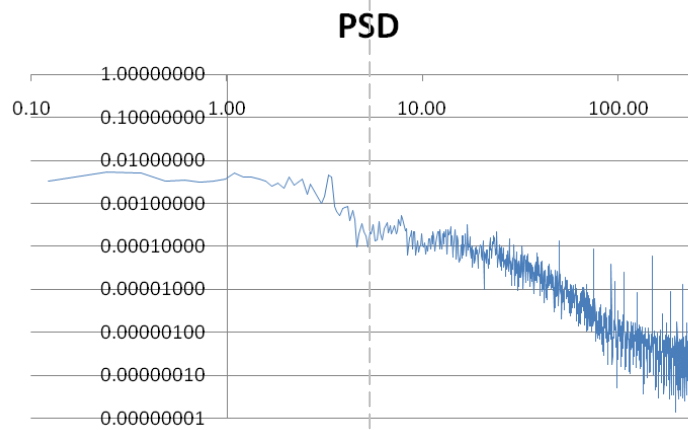


図 5.74 case002B パワースペクトル密度 (point3 変化後)

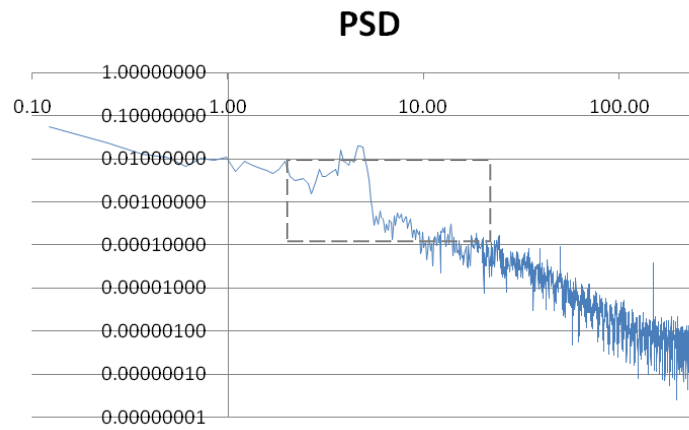


図 5.75 case002B\_10 パワースペクトル密度 (point3 変化中)

## 5. 5 考察

### 5. 5. 1 結果の考察

#### (1) 一様流の場合

齊藤による「正方形断面角柱に加わる変動風圧の空間的相関特性」<sup>5)</sup>では、一様流における風圧係数を求めている。実験は東京大学工学部建築学科の小型乱流風洞にて行っている。測定洞は、長さ 5.1m×幅 1.0m×高さ 0.7m である。風圧模型は、一辺 60mm の正方形断面を持ち、長さ 900mm である。模型の一方に相対する 2 面の横方向の中心線上には、中央部から左右 250mm ずつの範囲で 10mm 間隔に、直径 0.3mm の測定点がある。ここでの、一様流における平均風圧係数は、気流に正対する測定点では 0.82, 2 面ある側面の測定点では -1.13 及び -1.00 の値を出している。風洞や模型の大きさは違うが、参考に本研究の値を比較してみると、気流に正対する測定点(point5)では 0.83, 側面の測定点(point2)では -1.06 の値を出しており、本研究での風圧の値が妥当であることを示唆している。

また、坂本らによる「LES による 2 次元角柱に作用する変動風圧力と流れの 3 次元構造の解析:2 次元計算と 3 次元計算の比較」<sup>6)</sup>では、Reynolds 数  $1.0 \times 10^5$  の正方形断面の 2 次元静止角柱まわりの流れについて、Large Eddy Simulation(LES)による 2 次元計算及び 3 次元計算を行っている。その結果を図 5.76 に示す。この結果と本研究の風上面の風圧測定点の値を比較すると、point4 や point6 が、point5 に比べ小さな値を出していることに納得がいくであろう。

図 5.77<sup>7)</sup>は、風洞の境界層流に置かれた 3 次元正方形角柱の壁面に作用する風圧力の時間変動の様子を示したものである。測定点ごとに異なる風圧力が観測されているが、お互いになんらかの関係を持ちながら変動していることが分かる。例えば、風上面に正対して風があたる場合の風上中央での風圧変動は、風速の変動成分  $u$  の比較によく追従している。

これは、本研究でも例えば図 5.8 と図 5.9 のように主流方向の風があたり、模型の中心高さに位置する point5 ではっきりと確認することが出来た。一方、模型上部は、風圧変動に風速変動との対応はあまり見られず、point1, point2, point3 すべてにおいて、正圧側より大きな値を出しており、特定周期の変動が明確にあらわれている。また、point1 においてははかかなり鋭いピークも見受けられる。図 5.77 における No.2 でも同様の現象が起きている。

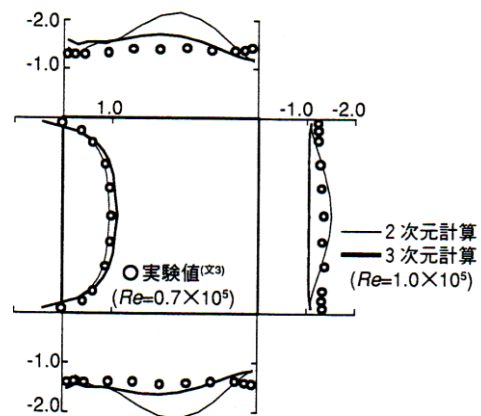
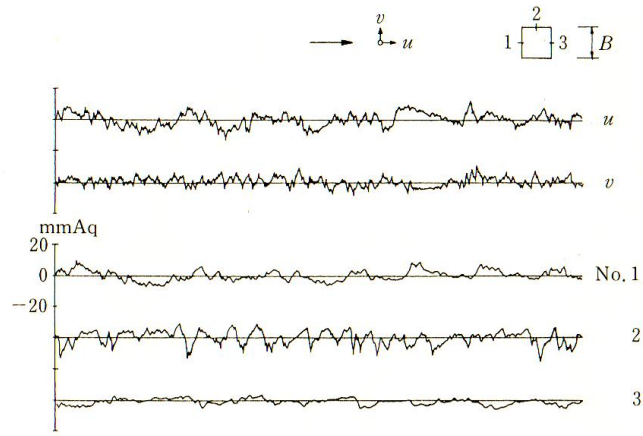


図 5.76 LES による風圧係数



(a) 風向角=0° (風上面, 側面, 風下面)

図 5.77 風速と風圧の時刻歴変化  
(風向角 0 度)



ここで、ストローハル数に関する検討を行う。角柱など非流線形物体の後流域には周期的な渦が放出され、放出する渦のことをカルマン渦と呼んでいる。一方の剥離点から独立渦が放出され、再び同じ側から同符号の循環を持つ渦が放出されるまでの時間間隔を、渦の放出周期 $T_v$ とする。その逆数 $f_v = 1/T_v$ は渦の放出周波数とよばれる。これは流速に比例するため、ストローハル数として、渦放出周波数は無次元化される。すなわち、ストローハル数は式(5.2)のように表わされる。

$$S_t = \frac{f_v D}{U} \quad (5.2)$$

ここで、

$f_v$  : カルマン渦の放出周波数       $D$  : 物体の代表長さ       $U$  : 流速

とする。

角柱のストローハル数 $S_t$ は辺長比 $D/B$ によって変化することが知られている<sup>4)</sup>。本研究での風圧模型の辺長比は、 $D/B = 100/100 = 1$ である。このときストローハル数 $S_t$ は、0.125程度であることが図5.78より分かる。

ストローハル数は流れのパターンがほぼ一定の状況下では物体の形状に固有であることが既に分かっており、角張った物体では剥離の位置がレイノルズ数によらず一定と考えられることから、ストローハル数もレイノルズ数の影響を受けにくいとされている。

図5.10から図5.15にpoint1からpoint6の周波数によるパワースペクトル密度を掲載した。負圧側であるpoint1からpoint3に関しては、すべて $f=5$ 程度でピークを出していることが分かる。風速が4m/s程度であることを考えると、(5.2)式より、ストローハル数は0.125になり、従来の結果と一致していることが確認出来た。

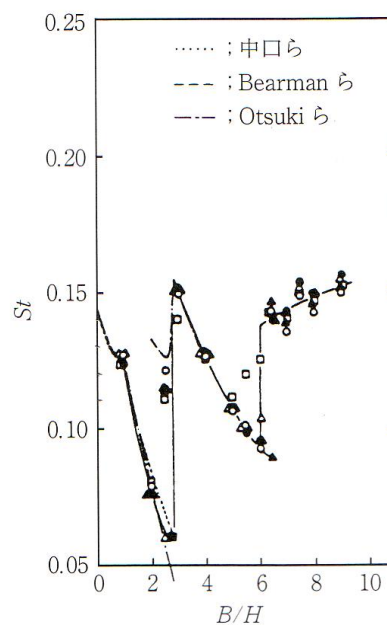


図 5.78 ストローハル数  
(B/H は本研究での D/B)

## (2) 一様流に傾けた模型を置いた場合

本研究では、一様流に傾けた模型を置いた場合のケースとして、5度、10度、15度の場合を測定した。そのときの平均風圧係数の時刻歴変化を図5.16から図5.21に示した。

図5.79<sup>7)</sup>は風上面に対して10度の角度で風が当たった場合の側面の風圧変動を示したもので、負圧側の鋭いピークが明瞭に現われている。本研究でもpoint2に着目すると、0度と比べ、5度や10度の方が、負圧のピークがはっきりとしていることが分かり、その傾向は15度でさらに強まっていることが分かる。全体としてみると、0度と5度の形状が似ており、10度と15度の形状が似ていることが分かる。

角度による傾向を把握するために、pointごとの平均風圧係数を表5.2に示す。また、視覚的に変化が分かるように同様の値を図5.80に示す。

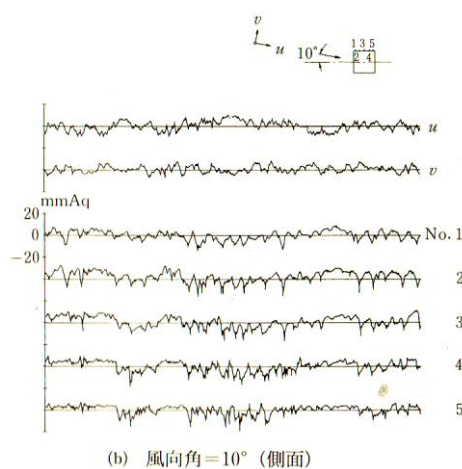


図 5.79 風速と風圧の時刻歴変化  
(風向角 10度)

表 5.2 模型を傾けた場合の平均風圧係数

	point1	point2	point3	point4	point5	point6
0度	-1.13	-1.06	-1.03	0.16	0.83	0.38
5度	-1.05	-1.13	-1.05	0.21	0.84	0.41
10度	-0.82	-1.20	-1.14	0.25	0.84	0.37
15度	-0.69	-1.03	-1.07	0.37	0.83	0.26

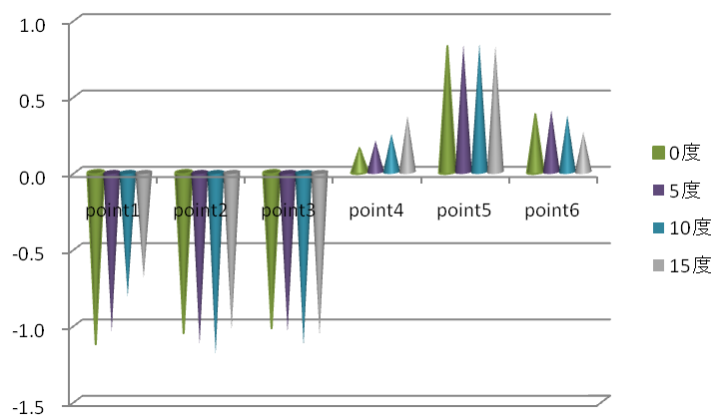


図 5.80 模型を傾けた場合の平均風圧係数

これらから、模型を傾ける角度の変化による point ごとの考察を行う。

point1 に関しては、模型を傾ける角度が大きいくほど、負圧は小さくなる事が分かる。特に、15 度のとき、0 度に比べて、その風圧係数は約  $1/2$  まで下がっている。

point2 に関しては、10 度まで負圧が大きくなっているものの 15 度になると風圧係数が再び小さくなっている。また、10 度のときの値はすべての中で最も大きな負圧で、-1.2 程度である。

point3 に関しては、10 度のときに最も風圧係数が高くなっている事が分かる。その値は-1.14 である。

point4 に関しては、模型を傾ける角度が大きいくほど、大きな平均風圧係数が出ている事が分かる。15 度における値は 0 度における値の 2 倍以上であるが、全体としての風圧係数は小さい事が分かる。

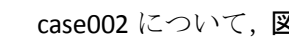

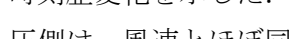
point5 に関しては、ほぼ同じ値を出している事が分かる。また、その値は正圧の中では最も大きい、負圧に比べると小さく、その値は 0.8 程度である。

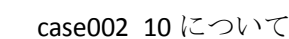
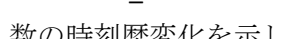
point6 に関しては、0 度、10 度では同じような値を示している。5 度では少し高くなり、15 度では少し下がっている。

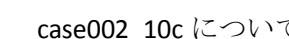
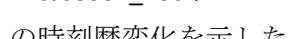
重要な点は、模型を傾ける角度が 10 度のとき、point2, point3 で負圧が最大になっていることである。しかし、その値はあくまで角度に従って段階的に大きくなっている事が分かる。

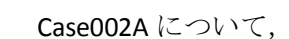
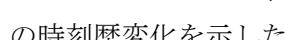
### (3) 風向変化のある風に模型を置いた場合

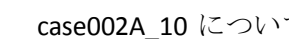
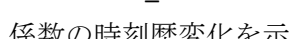
まずは、個々のケースについての考察を行う。

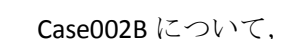
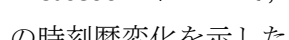
case002 について、  にピトー管の風速の時刻歴変化を、 に模型の風圧係数の時刻歴変化を示した。このとき、風速の減少と共に風圧が減少していることが分かる。正圧側は、風速とほぼ同時刻に同様の風圧変化が起きているのに対し、負圧側は風速に対する変化がやや鈍くなっているのが特徴である。風向変化開始直後に大きな変動が見られ、それは特に負圧側で鋭く現われている。また、その変動は、下がったり上がったりを繰り返しながら、変化後に一定の値に落ち着いている。変化後は、模型の一樣流方向、上部に位置する point4 が、下部に位置する point6 より正圧が大きくなっており、風向角の変化の影響がはっきりと出ている。また、その形状は case000\_10(模型を 10 度傾けた場合)や case000\_15(模型を 15 度傾けた場合)と似ている。

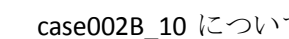
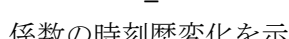
case002\_10 について、 にピトー管の風速の時刻歴変化を、 に模型の風圧係数の時刻歴変化を示した。風速は case002 に比べて変動は小さいものの、風速が減少する時に、下がったり上がったりを繰り返しながら、変化後に一定の値に落ち着いている点は同じである。それに伴い、正圧の変動があることが分かった。一方、負圧側は、風速の変動には影響を受けずに変化している。そして、変化後は、case002 と同様の形状になった。

case002\_10c について、 にピトー管の風速の時刻歴変化を、 模型の風圧係数の時刻歴変化を示した。case002\_10c は直線的にファンを止めるのではなく、コサインカーブでファンを止めているため、直線に比べ変化直後の変化は少ないものの、その後急激に風速が変化する状況も含まれている。そのため、case002\_10 と比べると、最初の変動が大きく、その後の変動が少ないことが確認出来た。

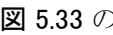
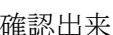
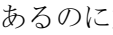
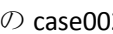

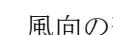
Case002A について、 にピトー管の風速の時刻歴変化を、 に模型の風圧係数の時刻歴変化を示した。case002A は case002 に比べ、風向が比較的大きく変化するにも関わらず、風向変化時の風圧の乱れが少ないことが分かる。しかし、風向変化開始直後に少し大きな変動が見られることは case002 と同様である。

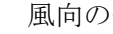

case002A\_10 について、 にピトー管の風速の時刻歴変化を、 に模型の風圧係数の時刻歴変化を示した。case002A に比べ、風圧の乱れがさらに小さいまま変化する様子が確認出来る。

Case002B について、 にピトー管の風速の時刻歴変化を、 に模型の風圧係数の時刻歴変化を示した。case002B は case002A に比べ、正圧の乱れは大きく、負圧の乱れが小さいことが分かる。また、変化後は負圧が最も大きいのは point3 で、次が point3、その次が point1 となっており、その形状は他のケースと異なることが分かる。ここでも、風向変化開始直後に非常に大きな変動が見られる。

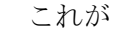

case002B\_10 について、 にピトー管の風速の時刻歴変化を、 に模型の風圧係数の時刻歴変化を示した。case002B に比べ、風圧の乱れがさらに小さいことが分かる。

これらから、変化後の形状としては、case002、case002A が模型を 15 度傾けた場合と似ており、case002B は point5 の正圧が少し小さい point4 の値に近付き、point2 の負圧が point3 より小さい値になっているという意味で、独自の形状を取っている。しかし、どちらの場合も最大の正圧を取る point、最大の負圧をとる point は同じであり、またその比率も同じである。

ここで着目すべきは、2 秒の変化過程と 10 秒の変化過程の時刻歴変化である。例えば、 5.33 の case002B と  5.35 の case002B\_10 では、case002B\_10 で変化が安定して起こっているのに対し、case002B では、風向変化開始直後に、正圧側で圧力が減少していることが確認出来、負圧側にも瞬間的に鋭いピークを確認出来る。その値は、その前後が-1.1 程度にあるのに対し、-1.4 程度である。他に、 5.23 の case002 と  5.25 の case002\_10 や  5.29 の case002A と  5.31 の case002A\_10 でも同様の現象が確認出来る。

風向の変化による違いに関する変化を確認するため、 5.36 から  5.71 に代表例として風向変化の大きい case002A と case002A\_10 の周波数によるパワースペクトル密度を掲載した。また、ファンの変化時間の違いも分かるよう、ファンの停止時間が 2 秒の場合と 10 秒の場合の 2 種類を掲載した。一般的にパワースペクトルを描くときには、横軸を風速で無次元化した値に設定するが、本研究では、風速を変化させているため、横軸は周波数とし、単位は Hz である。同様に、縦軸も風速の標準偏差で無次元化せず、単位は  $(\text{mmAq})^2 \cdot \text{s}$  である。

模型上部にある point1 から point3 では、変化前と変化後でピークの位置が周波数の短い成分の方へ変化していることが確認出来る。変化前のピークが集中的にその周波数成分に多かったのに対し、変化後は、そのピーク周辺の周波数成分がなくなり、相対的に広い範囲の周波数成分が多くなっていることが分かる。周波数成分が広い範囲になったことからそれぞれの成分のパワースペクトル密度は相対的に小さくなっていることが分かる。

これが、case002A の特有の現象かどうかを探るため、 5.72 から  5.74 に case002B の変化前・変化中・変化後のパワースペクトル密度を示した。その結果、case002B でも変化後に、変化前のピークの周波数成分がなくなっていることは確認出来た。新たなピークは case002A ほどははっきりとは現れなかったが、同様の位置に現れた。これらから傾向は同じであることが分かるが、case002B は、case002A に比べれば、様々な成分が混在していることが確認出来た。

変化の様子は特に point3 で敏感に反応している様子が確認出来、そのパワースペクトル密度をよく見ると、変化前の周波数成分のピークより大きな周波数領域(10Hz 前後)ではパワースペクトル密度が低下し、それより小さな周波数領域(5Hz 以下)では、新たなピークの位置のみで比較的大きなパワースペクトル密度を持つことが分かった。変化前と変化後でピ

ークの位置が変わる理由をはっきりとはしないが、変化前の一様流の状態から風向が変わるという外力を加えられたことで気流の周期が長くなった可能性が考えられる。しかしおそらく、もともと単位長さで捉えていた模型の一辺(0.1m)が、角度が変わったことによって、相対的に大きくなるのが原因であろう。その風向変化角から変化後の一片の長さを考えてみると、変化前の 1.16 倍になることが分かった。模型がある場合の point3 と同じ高さの風速は測定することが出来ないで、風速が変化前後で一定であると仮定するならば、その周波数は計算上 4.6Hz になることが分かった。風速が少し減少することを考慮すれば、新しい周期のピーク値が 4Hz 程度になることは納得がいくであろう。

ファンの停止時間が 2 秒の場合と 10 秒の場合において、模型上部にある point1 から point3 における変化の過程でパワースペクトル密度に違いが現れた。図 5.37, 図 5.40, 図 5.43, 図 5.46, 図 5.49, 図 5.52 の四角で囲った部分に着目すると、10 秒で変化させた場合に対し、2 秒で変化させた場合の方が、変化前のピークの周波数成分より少し高い周波数の位置で、パワースペクトル密度が大きくなっていることが分かる。その傾向は、point3 で最も顕著に現われている。同様に、図 5.73 における case002B と図 5.75 における case002B\_10 でも確認すると、2 秒間の変化過程において 10Hz 前後の周波数成分が 10 秒間での変化に対して多いという同様の現象が確認出来た。また、ここでのパワースペクトル密度は、基本的に 8 秒間のデータを 4 回平均したものをを用いている。ただし、停止時間 2 秒に関しては 2 秒間のデータで行っているので、case002A\_10 の停止時間 10 秒間のデータを 2 秒ごとに区切ってパワースペクトルを算出した(図 5.81)。例えば、ここでの凡例 11 は、11 秒から 13 秒の 2 秒間のパワースペクトル密度であることを意味している。

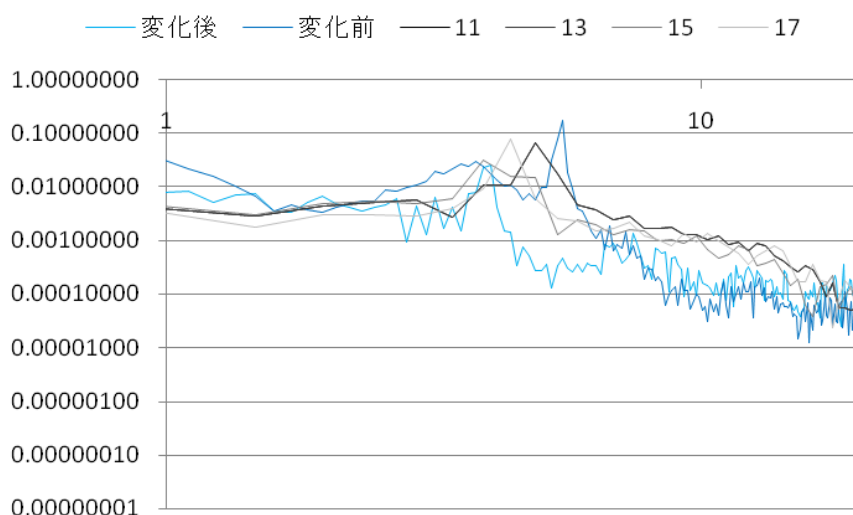


図 5.81 ファンの停止時間 10 秒における 2 秒ずつの変化

この結果を見ると、変化開始 2 秒後には既にピークの位置の周波数成分が減少し、その代わりにそれより少し周波数の短い成分が増加している。その後時間とともにピークの位置が少しずつ短い周波数成分の位置にずれ、最終的な位置に落ち着くことが分かる。また、最終的な位置に至ると、変化前のピークの周波数成分より少し高い位置(10Hz 前後)でパワースペクトル密度が上昇していた周波数領域が、変化前とほぼ同じ状態に落ち着くことが分かる。ピークの周波数は 5Hz 程度から 4Hz 程度に変化し、10Hz より少し長い周波数領域で変化後のパワースペクトル密度が大きくなっていることが分かる。

一方、図 5.54 から図 5.71 に示した正圧側に位置する point4 では若干の変化が確認されたが、これは模型上部の渦の影響を受けていることが考えられる。また、point5, point6 では、2 秒と 10 秒の変化に大きな違いは現れなかった。変化前にあった幅の広いピークの周波数領域が変化後にはなくなり、様々な大きさのエネルギーを持つ気流が入り混じっている状態になることが分かる。また 10Hz を超えた周波数領域で変化後にパワースペクトル密度が少し大きくなる傾向が伺える。

ここで、前述した谷池の研究<sup>3)</sup>のデータを示す(図 5.82)。ここでは屋根面のピーク外圧係数を求めているので、本研究との直接的な比較は出来ないが、風向の変動を発生させた場合に大きなピーク外圧係数が発生することが確認されている。

これらから、模型を風向変化のある風に置いた場合の風圧の変化と一様流に傾けておいた場合とで比較したところ、瞬間的にファンを止めた場合に、負圧が一時的に大きくなることが確認出来た。すなわち、谷池らの研究<sup>3)</sup>も含めて考えれば、風向変化のない気流に比べ、風向変化のある気流は、瞬間的な風向変化の過程において、屋根面及び側面の負圧を増加させることが分かった。

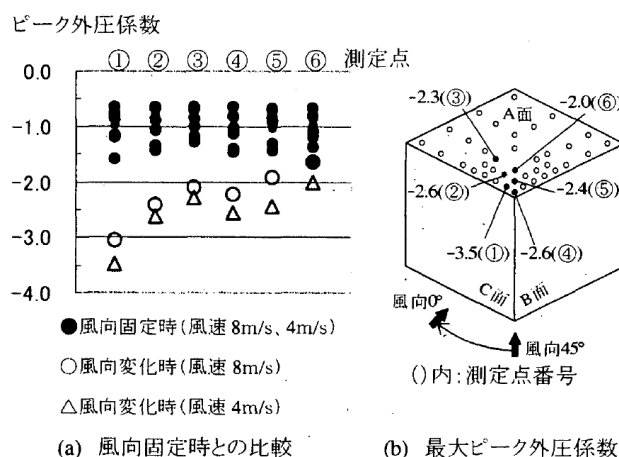


図 5.82 ピーク外圧係数の変化

## 5. 5. 2 実測の数値との比較

田村らによる「正方形平面の風応答・風向特性に対する風向の非定常性の影響」<sup>8)</sup>では図 5.82 に示したような風圧測定用の建物を用いて、1998 年 9 月 16 日の台風時の 2 時から 10 分間の自然風での風向及び主流直角風速、風圧力を測定している。風速及び風向の時刻歴波形の一部を図 5.82、図 5.83 に、図 5.84 に 5ch の風圧力の時刻歴データを示す。なお、実測時の風圧係数は内圧係数との差圧を取っており、風速測定位置での 10 分間平均値に基づいて各測定点、各時刻での風圧係数を補正している。

本風洞では、9 度程度の風向変化が起きることが既に確認されており、そのときの風圧測定実験から風向角が変わる過程で、最初の値より、大きな負圧が一時的に発生することが分かった。この一時的とは、実験での 2 秒間に値するため、想定した縮尺で換算すると、20 秒間に相当することになる。すなわち、20 秒間で風向が 10 度程度変化する過程で、これまでにない比較的大きな負圧が確認されたことになる。

この実測データでは風向 90 度を基準としている。この値が本研究での 0 度に相当する。5ch での 90 度から 99 度までの風向変動が、本研究での point2 もしくは point3 における 9 度の風向変動に相当することが分かる。この部分に相当するような風向変化を水色の四角で示した。ここでの風圧変動を見てみると、例えば、左の四角では、15 秒程度で風圧係数が-1.0 から 0.0 に変化していることが分かる。中央の四角では、10 秒程度で-0.5 から-0.8 に変化していることが分かる。右の四角では、5 秒程度で風向はあまり変化していないことが分かる。それぞれの風向変化が起きる前の状態を確認すると、中央の四角のみが風向 0 度である。他の 2 つでは風向の大きい状態から下がった後、風向が 9 度変化していることが分かる。この違いが風圧係数の正の変化と負の変化の違いを生んだことが予想される。ただし、この 3 つの例だけで判断することは出来ないため、自然風の一例として参考を示している。

本研究では、例えば図 5.33 を見ると、case002B の point3 で風圧係数が-1.0 程度から-1.4 に変化していることが分かる。ここから、この変化が妥当な値であるかどうかは述べるこ

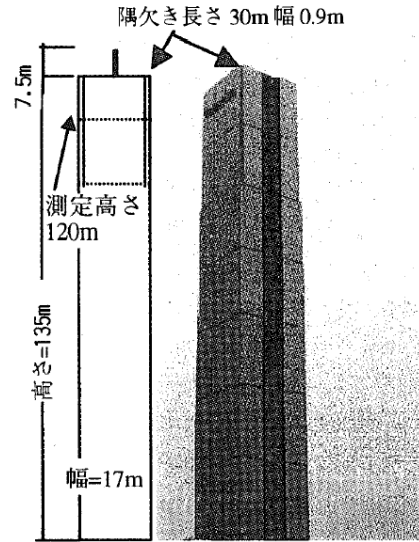


図 5.82 風圧測定用の建物

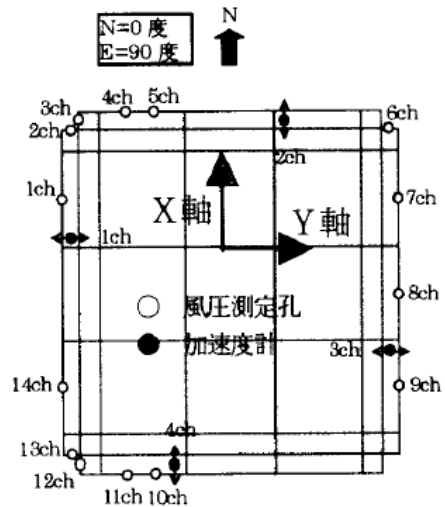


図 5.83 風圧測定位置



とが難しいが、自然風の中で起きている 10 数秒程度の風向変化が建物に風圧の変化を与えていることが指摘されていることに対し、本風洞でも 2 秒間で風向を約 10 度変化させた場合に、模型の負圧が一時的に増加するという現象が起きることが分かった。これは、この種の風向変動を持つ気流が建物へ影響を与えることを示唆しており、このような実験で、定常な実験では再現できない現象を捉えられる可能性を示すことが出来た。

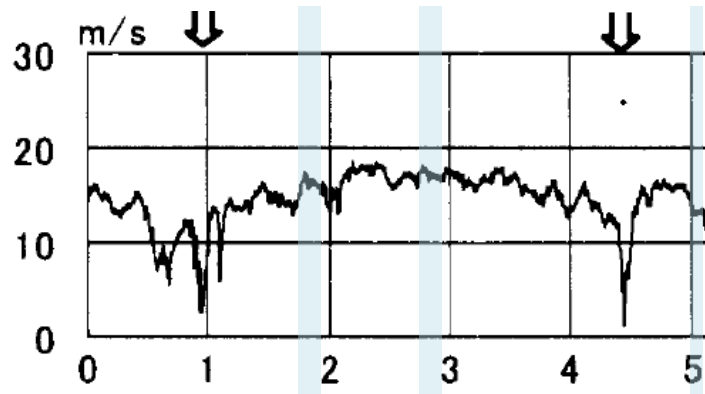


図 5.84 主流方向平均風速の時系列変化

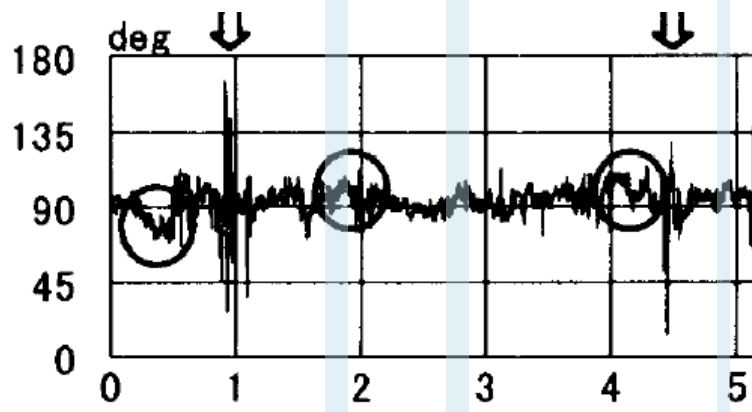


図 5.85 風向角の時系列変化

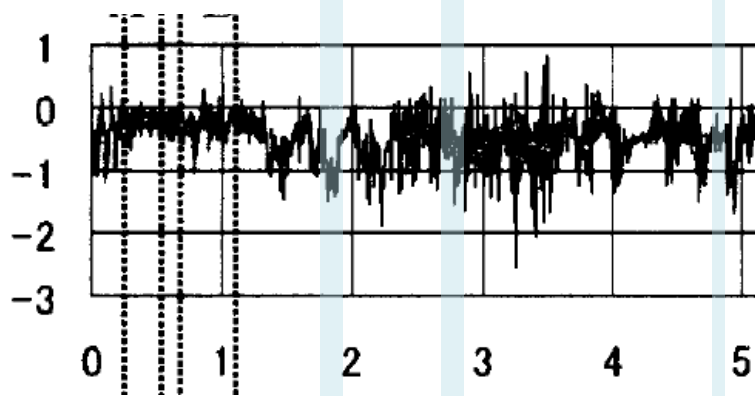


図 5.86 風上側面風下の風圧係数(5ch)

## 5. 6 おわりに

本章では、4章の風向変動実験で作成した気流が建物にどのような影響を齎すかを風圧の点から検討した。

一様流の結果からは、模型上部で風速が加速することを確認した。また、周波数のパワースペクトル密度を算出した結果、既往の研究データと同じストローハル数  $S_t = 0.125$  であることが確認出来た。

次に、従来可能であった一様流の中に傾けた模型を置いた場合の風圧では、point2, point3 において、10度模型を傾けたときに最大の負圧が確認された。

最後に、4章で作成した風向変化のある風に模型を置いた場合の風圧を測定した結果、変化後の風圧係数は、概ね一様流の中に傾けた模型を置いた場合の風圧係数と一致していることを確認した。

case002, case002A, case002B のような2秒間でファンを停止した場合において一時的な負圧の増大(約1.5倍)が見受けられた。また、10秒間でファンを停止した場合にはそのような現象は見られないことが分かった。さらに、そのときの変化の過程での周波数のパワースペクトル密度を比較してみると、2秒で変化させた場合の方が、変化前のピーク周波数領域より少し長い周波数領域でのパワースペクトル密度が大きくなることが分かった。ただし、10秒間で変化させた場合においても2秒間ずつのパワースペクトル密度を比較すると、その過程において2秒間の場合と同様の様子になっていることが確認出来、変化前のピークの周波数領域が徐々に減少し、新たな周波数領域にピークが生まれていく様子が確認出来た。

変化前と変化後では、風向が変化することで低周波数領域に周波数成分のピークが移行することが分かった。

このように、本風洞で作成した風向変動を持つ気流は、定常な実験では再現できない風圧の変化という現象を引き起こすことが分かり、非定常な風向変化が、建物の風圧に影響を及ぼしている可能性が高いことを示唆している。本研究の成果から、今後このような風向変動を持つ気流の作成を行う実験が、自然風を再現する上で重要であることが再確認された。

## 参考文献

- 1) 日本風工学会編，風工学ハンドブック，日本風工学会，2007
- 2) 鈴木雅靖・田村哲郎，正方形角柱の空力振動特性の風向依存性に関する研究，日本建築学会構造系論文集 518 号，1999
- 3) 池内淳子・谷口徹朗・谷池義人，瞬間的な風向変化により外装材に作用する風圧力，日本建築学会大会学術講演梗概集，2002
- 4) 日野幹雄，スペクトル解析，朝倉書店，1977
- 5) 斉藤和生，正方形断面角柱に加わる変動風圧の空間的相関特性，東京大学大学院工学系研究科建築学専攻，修士論文，1992
- 6) 持田灯・村上周三・坂本成弘，LES による 2 次元角柱に作用する変動風圧力と流れの 3 次元構造の解析：2 次元計算と 3 次元計算の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，1993
- 7) 大熊武司・神田順・田村幸雄，建築物の耐風設計，1996
- 8) 鈴木雅靖，田村哲郎，眞田早敏，山本学，正方形平面の風応答・風向特性に対する風向の非定常性の影響：実測と風洞実験結果との比較に基づく一考察，日本建築学会構造系論文集，第 550 号，2001

## ■ ■ 6. 結論

本研究では、アクティブ型風洞の1つである1列6段のファンを持つ複数ファン風洞を用い、風向変動を持つ気流の作成を行った。さらに、その風向変動を持つ気流を用いて建物に与える影響を風圧の面から検討した。

第1章では、耐風設計の変遷やアクティブ型風洞の位置付けについて、既往研究を例に挙げながら説明した。その中で、現実には非定常な風速変化や風向変化が建物に影響を及ぼすことが指摘されていることを述べた。

第2章では、本研究で使用する風洞設備の概要を述べた。一様流の平均風速鉛直分布や乱れの強さを明らかにするとともに、全てのファンを一定に回転させた状態が基本の状態として妥当であることを確認した。

第3章では、本風洞において風向の変化を確認する実験が行われたことがないため、どのような風向変化が起きるのか、可視化実験を行うことで確認した。

その結果、ファンを止めた場合に水平に流れていた気流が下向きに流れ始めるという風向の変化を確認することが出来た。また、比較的多くのファンを停止すると、ファンを停止した下部では気流が停滞する現象が確認出来、気流の乱れが大きくなっているように感じられた。また、風向変化の位置は主流方向  $x=1000\text{mm}$  程度で最も大きく変化していることが分かった。

第4章では、3章にて風向変化の大きかった  $x=1000\text{mm}$  での  $x$  型熱線風速計を用いた風速測定を行った。

ファンを停止させた場合には、最大6度の風向変化が起きた。ただし、ファンを停止する数を増やすほど、風向変化が大きくなるというわけではないことが分かった。具体的に本風洞では、1つ停止した場合より2つ停止した場合の方が風向変化は大きい、3つ停止しても2つの時と変わらないことが分かった。今回測定したケースの中では、ファンの強弱を組み合わせさせた場合(case002A,002B)において、最も大きな10度程度の風向変化が作成出来ることが分かった。

本風洞のファンの停止時間には性能上最低2秒を要するが、その停止時間を変化させて測定を行ったところ、すべてのケースにおいて安定した値が得られた。ただし、変化を起こしたファンの近くでは、ファンの停止時間2秒、5秒、20秒よりも10秒以上の方が安定していることが分かった。

第5章では、4章で作成した風向変動のある気流を吹かせた時に模型にかかる風圧を測定した。また、従来の風洞でも可能である、傾けて設置した模型に風向変化のない風を吹かせる場合の風圧も測定し、比較を行った。

一様流の結果からは、模型上部で風速が加速することを確認した。また、周波数のパワースペクトルから、ストローハル数が従来の数値(0.125)と同じになることを確かめた。

傾けて設置した模型に風向変化のない風を吹かせた場合では、模型上部にある最も風上側の測定点及び模型上部の中心の測定点において、10度模型を傾けた場合に負圧が最大になることが分かった。

風向を10度程度変化させた気流では、風向変化後の風圧係数が、10度模型を傾けた場合と概ね同じ値になることが確認出来た。

風向変動のある気流を吹かせたとき、10秒間でファンを停止した場合は比較的安定しているのに対し、2秒間でファンを停止した場合には、瞬間的な負圧の増大(約1.5倍)が見受けられた。このときの周波数のパワースペクトル密度を比較すると、変化の過程において、10秒で停止した場合より2秒で停止した場合の方が、変化前のピークの周波数領域(5Hz程度)よりも少し高い周波数領域(10Hz前後)でのパワースペクトル密度が大きくなることが分かった。また、10秒の場合も2秒ごとのパワースペクトル密度を確認すると、その過程で同様の現象が起こっていることが確認出来た。

さらに、風向変化前と風向変化後の周波数のピークの位置は、少しではあるが短い周波数領域に移行していることが確認出来た。

本風洞では、自然風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作成出来ることが分かった。また、そのファンの停止時間は、2秒から20秒で可能であることも確認出来ている。

そして、風向変動を持つ気流のうち、2秒間で風向変化をした場合に、模型上部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、風向変動を考慮することで、定常な実験では再現することの出来ない現象を捉えられる可能性を示した。

■ ■ 付録



## 1. 補正について

本研究では、測定に x 型熱線風速計を用いている。そのため風向角  $\theta$  は、主流方向の風速  $V_x$  と鉛直方向の風速  $V_z$  より、式(7.1)によって求めた。

$$\theta = \tan^{-1}(V_z/V_x) \quad (7.1)$$

測定結果の例を以下に示す(図 7.1)。

ここで問題となるのは、高さ方向すべてにおいて風向が正の値を取っているということである。この現象はほぼすべてのケースにおいて現われている。一般的に、熱線風速計のキャリブレーションは校正用風洞を用いて行うが、本風洞には校正用風洞はないため、あらかじめ校正用風洞を使って校正した際のデータを使ってプローブを校正している。そのため今回のような状況が発生したと考えられる。

x 型熱線計測計の形状は、図 7.2 の通りで、熱線が 2 本張られている。この 2 本にあたる風速を  $V_1, V_2$  とすると、式(7.2)を用いて、 $V_x, V_y$  が算出されている。

$$V_x = \frac{V_1 + V_2}{\sqrt{2}}, \quad \frac{V_1 - V_2}{\sqrt{2}} \quad (7.2)$$

図 7.3 は、 $x=800\text{mm}$  と  $1000\text{mm}$  の主流方向風速の比較である。もし、風向がすべての高さで正の値ならば、 $x=800\text{mm}$  に対する  $x=1000\text{mm}$  の風速は上部でより増加するはずである。例えば、 $z=500\text{mm}$  での風向は正の値をとっており、 $z=550\text{mm}$  では、ほぼ 0 の値をとっている。すなわち、 $x=800\text{mm}$  に対し、 $x=1000\text{mm}$  では風速は 0 以上の増加をしているはずである。しかし、その値は減少していることから、機械による補正計算が正しくない可能性が伺える。

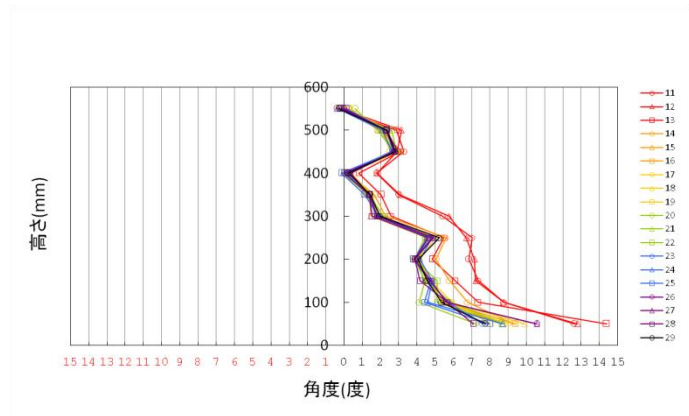


図 7.1 測定結果の例 (case001)

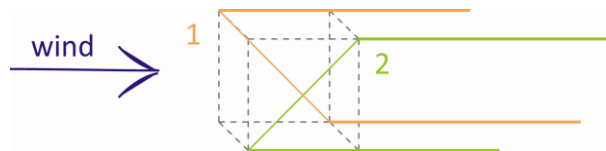


図 7.2 熱線風速計の形状

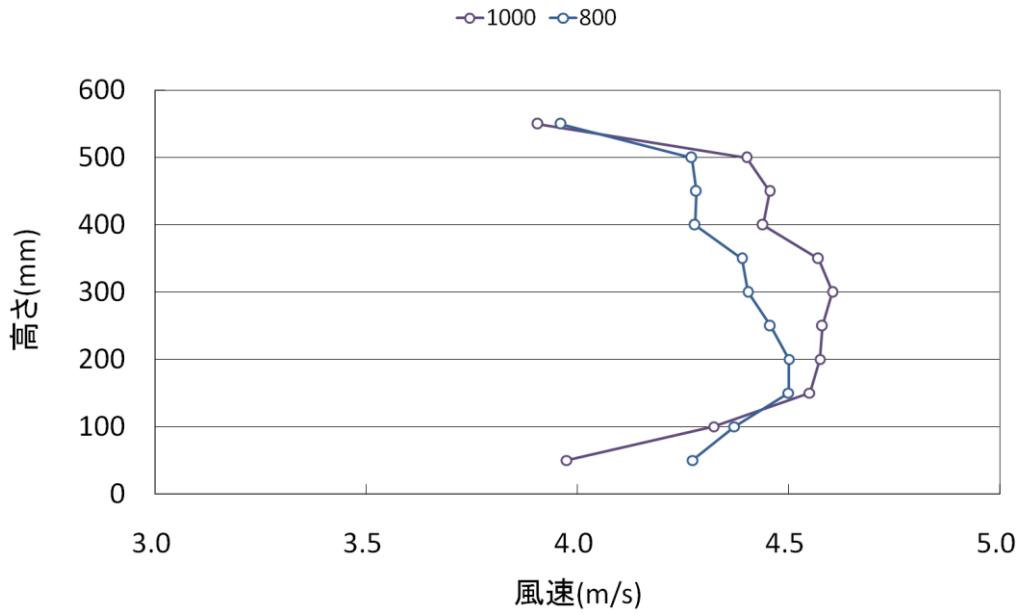


図 7.3 熱線風速計の形状

そこで、中心高さ( $z=300\text{mm}$ )での鉛直方向の風速が 0、すなわち風向が 0 度になるように補正計算を行った。表 7.1 はもともとの風向角を示している。

表 7.1 補正前の風向角 (case001)

高さ(mm) 時間(秒)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
10	12.51	8.90	7.49	6.93	6.70	5.56	3.12	1.57	3.18	2.99	-0.22
11	12.64	8.76	7.37	6.84	7.03	5.40	3.00	1.80	3.29	2.90	-0.39
12	12.80	8.77	7.23	7.15	6.70	5.75	3.08	1.82	2.90	3.16	-0.15
13	14.41	7.36	6.10	4.85	5.49	2.58	2.04	0.82	3.11	2.12	-0.17
14	9.30	6.79	5.78	5.06	5.60	2.27	1.68	0.26	3.02	2.24	0.31
15	8.71	5.46	4.57	4.01	4.54	1.48	1.40	0.34	2.74	1.87	0.34
16	9.39	5.61	4.72	4.03	4.76	1.98	1.26	0.03	3.07	2.01	-0.13
17	9.00	5.46	4.62	3.93	4.67	1.82	1.48	0.26	2.75	2.28	0.29
18	9.93	5.77	4.50	4.17	5.04	1.98	1.52	0.41	2.69	2.47	0.25
19	8.05	5.93	4.74	4.13	4.48	1.98	1.35	0.31	2.54	2.07	-0.10
20	7.24	4.13	4.44	3.87	4.86	1.79	1.27	0.38	2.72	1.88	0.61
21	8.74	5.88	4.39	3.97	4.85	1.89	1.34	-0.06	2.76	2.04	0.11
22	8.66	5.11	5.12	3.86	4.46	2.15	1.38	0.03	2.90	2.63	-0.13
23	7.61	5.72	4.62	3.87	4.77	1.72	1.41	0.35	2.75	2.41	-0.19
24	8.71	4.61	4.85	4.17	4.84	1.99	1.37	0.11	2.60	2.12	-0.35
25	7.98	4.42	4.78	3.82	4.57	1.88	1.14	-0.12	2.70	2.33	0.14
26	8.72	5.69	4.13	3.52	4.82	1.99	1.18	0.12	2.69	1.92	0.05
27	10.57	5.62	4.75	3.87	4.89	1.83	1.38	0.35	2.76	2.33	0.00
28	7.10	5.66	4.17	3.90	4.63	1.53	1.41	0.02	2.95	2.34	-0.12
29	7.75	5.35	4.55	4.07	5.23	1.97	1.45	0.24	2.82	2.34	-0.27
30	9.02	5.13	4.79	3.91	4.55	2.00	1.28	0.14	2.78	2.48	0.02

そこで、まず $\theta' = \theta - \theta_0$ として、補正計算を行った。その結果を表 7.2 に示す。

(1)  $\theta' = \theta - \theta_0$

表 7.2 補正後の風向角 (1)

高さ(mm) 時間(秒)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
10	6.95	3.35	1.93	1.38	1.14	0.00	-2.44	-3.99	-2.37	-2.57	-5.78
11	7.08	3.20	1.81	1.28	1.47	-0.16	-2.56	-3.76	-2.27	-2.66	-5.95
12	7.24	3.21	1.67	1.60	1.14	0.19	-2.48	-3.74	-2.65	-2.40	-5.71
13	8.85	1.80	0.54	-0.71	-0.07	-2.98	-3.52	-4.74	-2.45	-3.44	-5.73
14	3.74	1.23	0.22	-0.50	0.04	-3.29	-3.87	-5.30	-2.54	-3.32	-5.25
15	3.16	-0.10	-0.99	-1.55	-1.02	-4.08	-4.16	-5.22	-2.82	-3.69	-5.22
16	3.83	0.05	-0.84	-1.53	-0.80	-3.58	-4.30	-5.53	-2.49	-3.55	-5.69
17	3.44	-0.10	-0.94	-1.63	-0.89	-3.74	-4.08	-5.29	-2.81	-3.28	-5.27
18	4.37	0.21	-1.06	-1.39	-0.52	-3.58	-4.04	-5.15	-2.86	-3.09	-5.31
19	2.49	0.38	-0.82	-1.42	-1.08	-3.58	-4.21	-5.25	-3.02	-3.49	-5.66
20	1.68	-1.43	-1.12	-1.69	-0.69	-3.77	-4.29	-5.18	-2.84	-3.68	-4.95
21	3.18	0.32	-1.17	-1.59	-0.71	-3.67	-4.21	-5.62	-2.79	-3.52	-5.44
22	3.10	-0.45	-0.44	-1.70	-1.10	-3.41	-4.18	-5.53	-2.66	-2.93	-5.69
23	2.05	0.16	-0.94	-1.69	-0.79	-3.84	-4.15	-5.21	-2.81	-3.15	-5.75
24	3.15	-0.95	-0.71	-1.39	-0.71	-3.56	-4.19	-5.45	-2.96	-3.44	-5.91
25	2.42	-1.14	-0.78	-1.74	-0.98	-3.68	-4.42	-5.68	-2.85	-3.23	-5.42
26	3.16	0.13	-1.43	-2.04	-0.74	-3.57	-4.37	-5.44	-2.87	-3.64	-5.51
27	5.02	0.06	-0.81	-1.69	-0.67	-3.73	-4.18	-5.21	-2.80	-3.23	-5.56
28	1.54	0.10	-1.39	-1.66	-0.93	-4.03	-4.15	-5.53	-2.60	-3.22	-5.67
29	2.19	-0.20	-1.00	-1.49	-0.33	-3.59	-4.10	-5.32	-2.73	-3.22	-5.83
30	3.47	-0.43	-0.77	-1.64	-1.01	-3.56	-4.28	-5.42	-2.78	-3.08	-5.54

次に、比例係数  $\tan \theta = \frac{a_1 u_1 - a_2 u_2}{a_1 u_1 + a_2 u_2}$  として補正計算を行った。

(2)  $\tan \theta = \frac{a_1 u_1 - a_2 u_2}{a_1 u_1 + a_2 u_2}$

$\tan \theta = \frac{a_1 u_1 - a_2 u_2}{a_1 u_1 + a_2 u_2}$  ,  $\tan \theta = \frac{a_1 u_{10} - a_2 u_{20}}{a_1 u_{10} + a_2 u_{20}} = 0$  より,

$\tan \theta = \frac{u_{20} u_1 - u_{10} u_2}{u_{20} u_1 + u_{10} u_2}$  である。

表 7.3 補正後の風向角 (2)

高さ(mm) 時間(秒)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
10	7.25	3.45	1.98	1.41	1.17	0.00	-2.47	-4.01	-2.40	-2.59	-5.78
11	7.39	3.30	1.86	1.31	1.50	-0.16	-2.59	-3.78	-2.29	-2.68	-5.94
12	7.56	3.30	1.71	1.64	1.17	0.20	-2.50	-3.77	-2.68	-2.43	-5.71
13	9.29	1.85	0.55	-0.72	-0.07	-3.01	-3.54	-4.75	-2.47	-3.46	-5.72
14	3.86	1.26	0.22	-0.51	0.04	-3.32	-3.90	-5.31	-2.57	-3.35	-5.26
15	3.25	-0.10	-1.00	-1.57	-1.04	-4.10	-4.18	-5.23	-2.84	-3.71	-5.22
16	3.95	0.05	-0.85	-1.55	-0.81	-3.60	-4.31	-5.53	-2.51	-3.57	-5.69
17	3.55	-0.10	-0.95	-1.65	-0.90	-3.76	-4.10	-5.30	-2.84	-3.30	-5.27
18	4.52	0.22	-1.08	-1.41	-0.53	-3.60	-4.06	-5.16	-2.89	-3.12	-5.31
19	2.56	0.38	-0.84	-1.44	-1.10	-3.60	-4.23	-5.25	-3.04	-3.51	-5.66
20	1.72	-1.45	-1.14	-1.71	-0.71	-3.79	-4.31	-5.18	-2.87	-3.70	-4.96
21	3.28	0.33	-1.19	-1.61	-0.72	-3.69	-4.23	-5.62	-2.82	-3.54	-5.45
22	3.19	-0.45	-0.45	-1.72	-1.12	-3.43	-4.20	-5.53	-2.69	-2.96	-5.69
23	2.10	0.17	-0.96	-1.72	-0.80	-3.86	-4.17	-5.21	-2.83	-3.17	-5.75
24	3.24	-0.97	-0.72	-1.41	-0.73	-3.59	-4.21	-5.45	-2.98	-3.46	-5.90
25	2.49	-1.16	-0.79	-1.76	-1.00	-3.70	-4.43	-5.68	-2.88	-3.25	-5.42
26	3.26	0.13	-1.45	-2.07	-0.75	-3.59	-4.39	-5.44	-2.89	-3.67	-5.51
27	5.20	0.06	-0.82	-1.71	-0.68	-3.76	-4.20	-5.21	-2.83	-3.25	-5.56
28	1.58	0.10	-1.41	-1.68	-0.95	-4.05	-4.17	-5.53	-2.63	-3.24	-5.67
29	2.25	-0.21	-1.02	-1.51	-0.34	-3.62	-4.13	-5.33	-2.76	-3.25	-5.83
30	3.57	-0.43	-0.78	-1.67	-1.03	-3.59	-4.30	-5.42	-2.80	-3.10	-5.54

(1)と(2)の補正計算の値の差を取ると、表 7.4 のようになり、その差はほとんど 0 に近く、補正計算の妥当性が確認できた。

表 7.4 補正前後の風向角差

高さ(mm) 時間(秒)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
10	0.30	0.10	0.05	0.03	0.03	0.00	0.03	0.02	0.03	0.03	0.00
11	0.31	0.10	0.05	0.03	0.04	0.00	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01
12	0.32	0.10	0.04	0.04	0.03	0.00	0.03	0.02	0.03	0.03	0.00
13	0.45	0.05	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.00
14	0.12	0.03	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.00	0.03	0.03	0.01
15	0.10	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01
16	0.12	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.02	0.00
17	0.11	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.03	0.01
18	0.15	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.00
19	0.07	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.00
20	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01
21	0.10	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.02	0.00
22	0.09	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00
23	0.05	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.00
24	0.10	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.02	0.01
25	0.07	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00
26	0.10	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.02	0.00
27	0.18	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.00
28	0.04	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00
29	0.06	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.03	0.01
30	0.11	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00

これらから、本研究でのプローブの値に関しては、(1)  $\theta' = \theta - \theta_0$  を用いて補正している

ことをここに示す.

## 2. 可視化実験データ

3 章では, 可視化実験における撮影画像の重要部分を示し, 考察を行った.

ここに各チャンネル(ch)の変化を示すため, 撮影開始後 10 秒, 15 秒, 20 秒, 25 秒における case001, case002, case003 のそれぞれのケースにおける画像を示す(図 7.3, 図 7.4, 図 7.5).

たとえば, case001\_ch1 とは, case001 における ch1 の可視化実験の画像で, 画像右下の数字は秒数を示している.

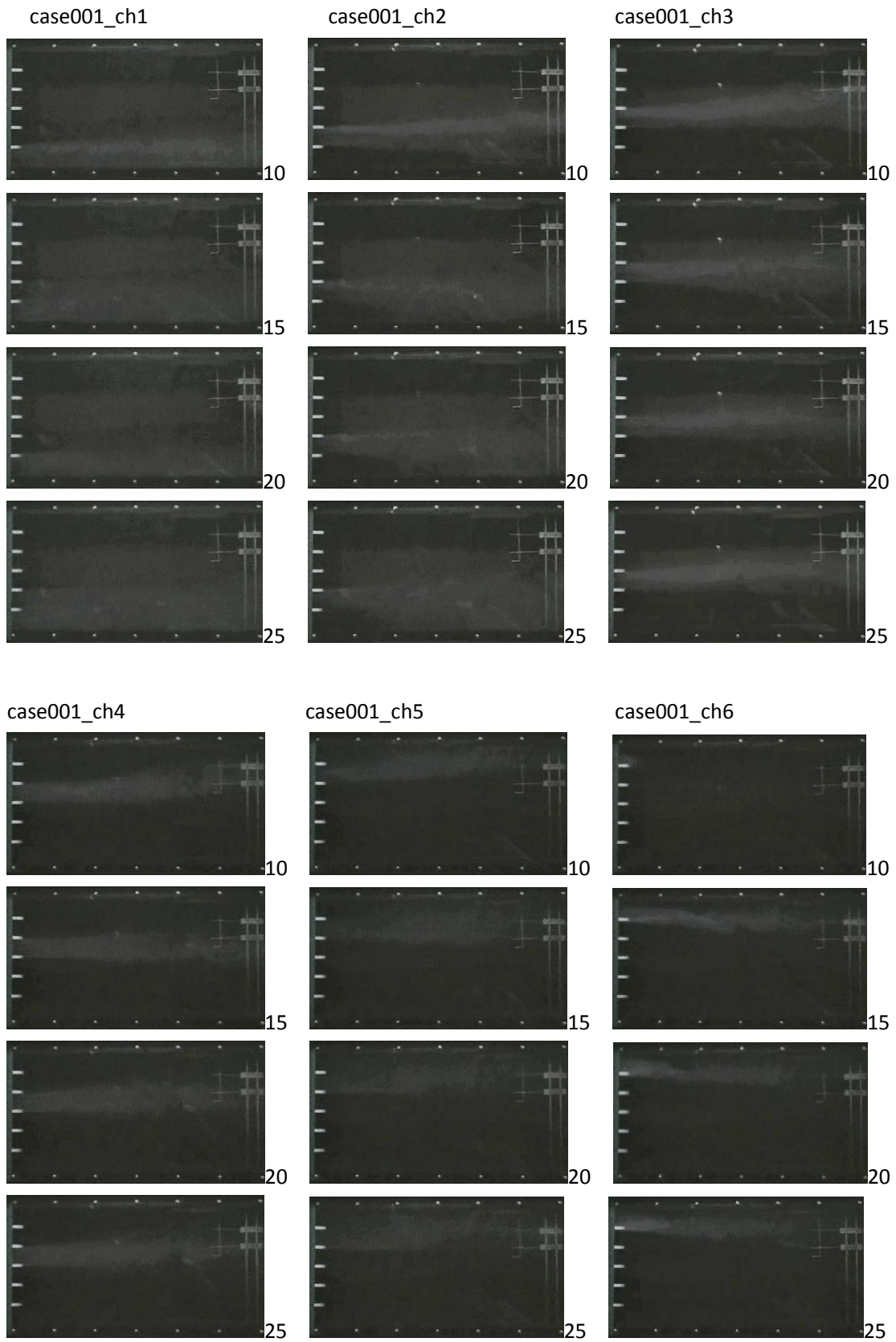
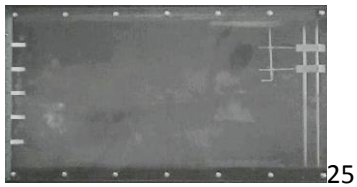
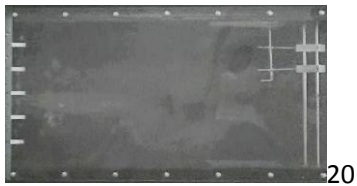
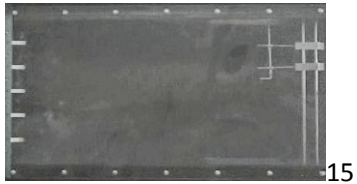
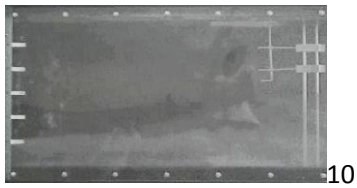
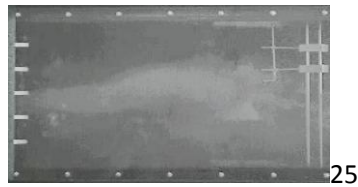
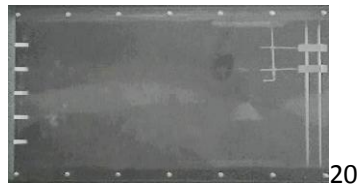
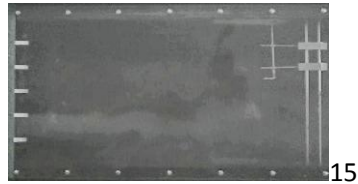
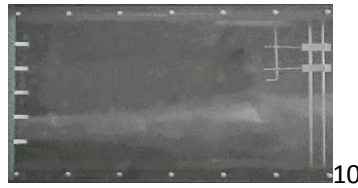


図 7.3 5 秒, 10 秒, 15 秒, 20 秒における case001 の各 channel の画像

case002\_ch1



case002\_ch2



case002\_ch3



case002\_ch4



case002\_ch5



case002\_ch6



図 7.4 5 秒, 10 秒, 15 秒, 20 秒における case001 の各 channel の画像

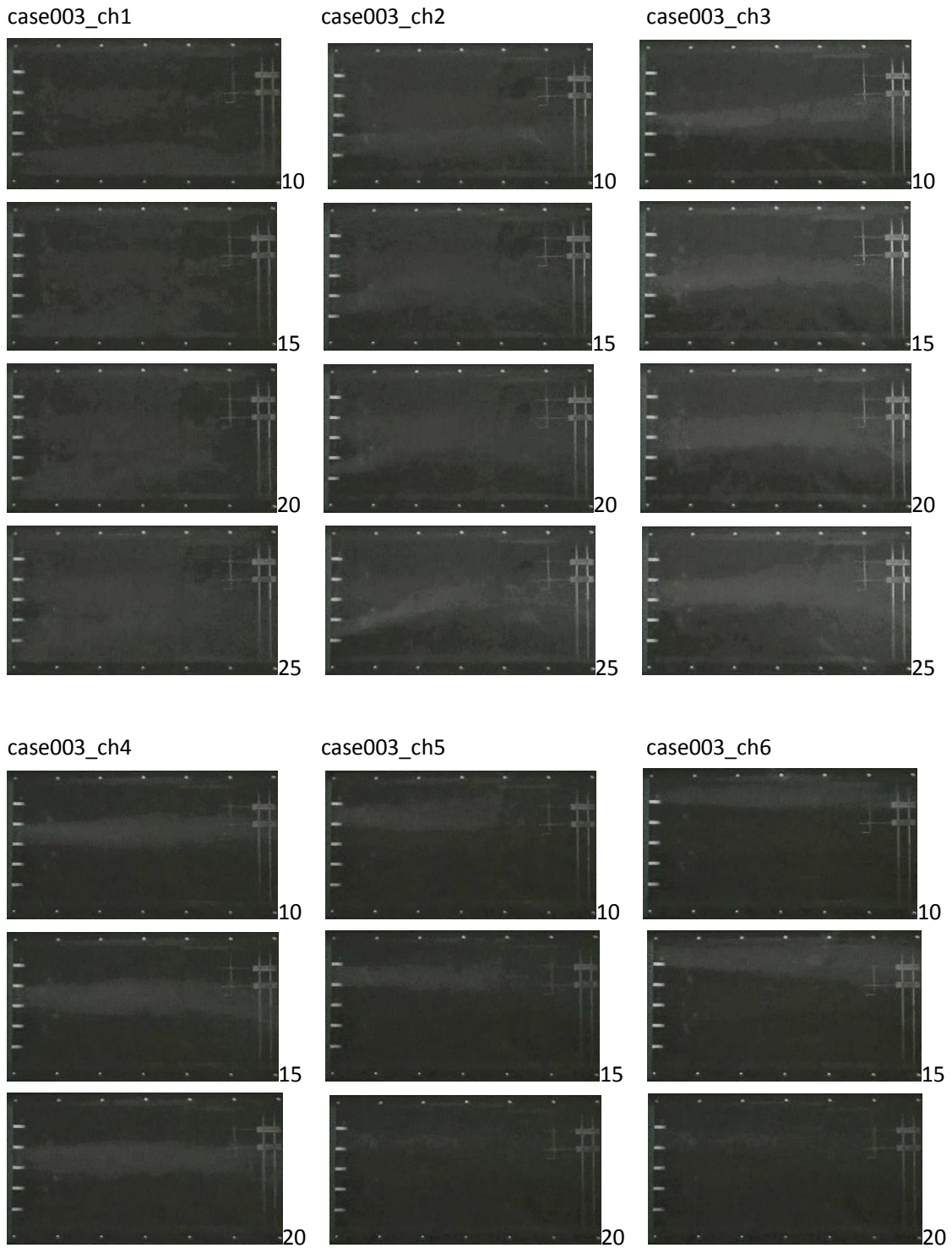






図 7.5 5 秒, 10 秒, 15 秒, 20 秒における case003 の各 channel の画像

### 3. 風圧測定データ

#### (1) ピトー管が 350mm の場合

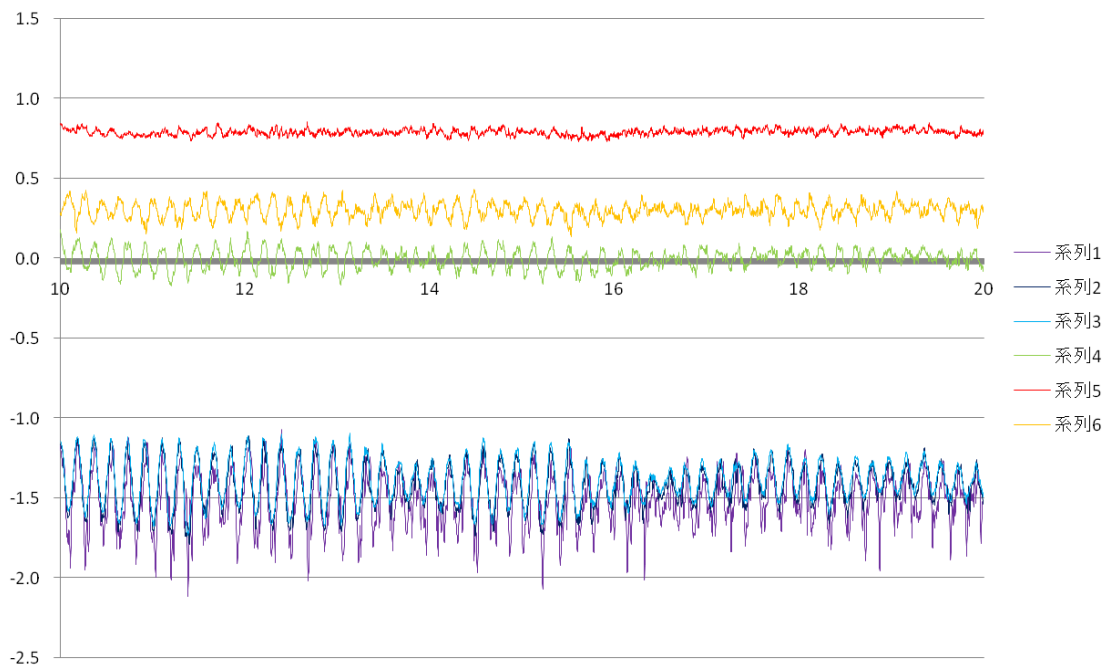


图 7.6 p350\_case000

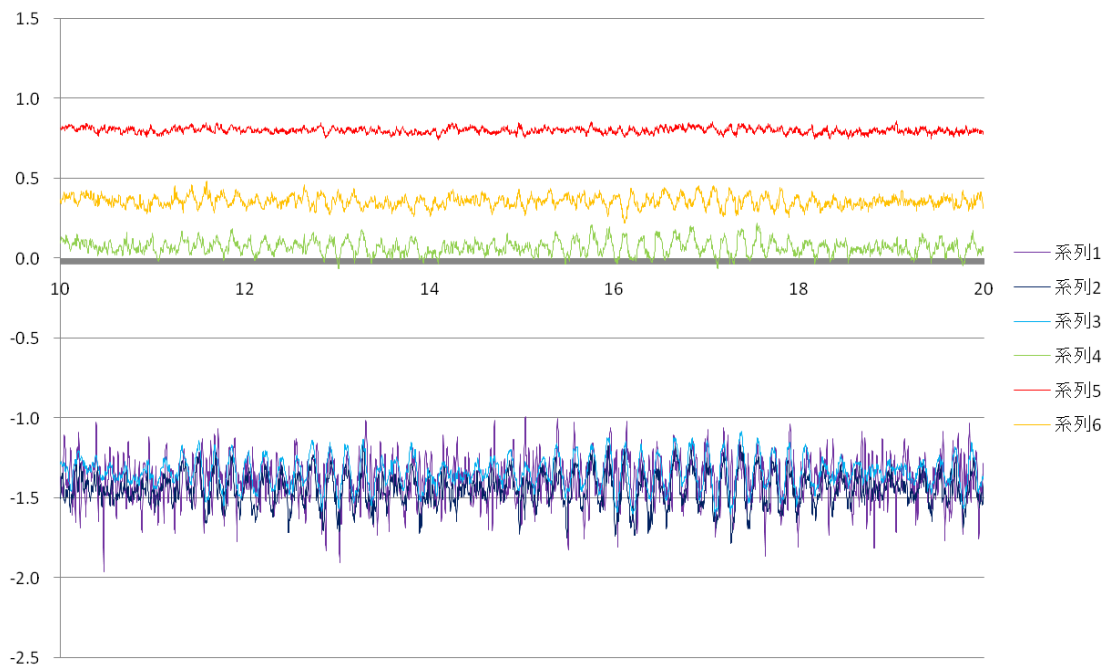


图 7.7 p350\_case000\_5

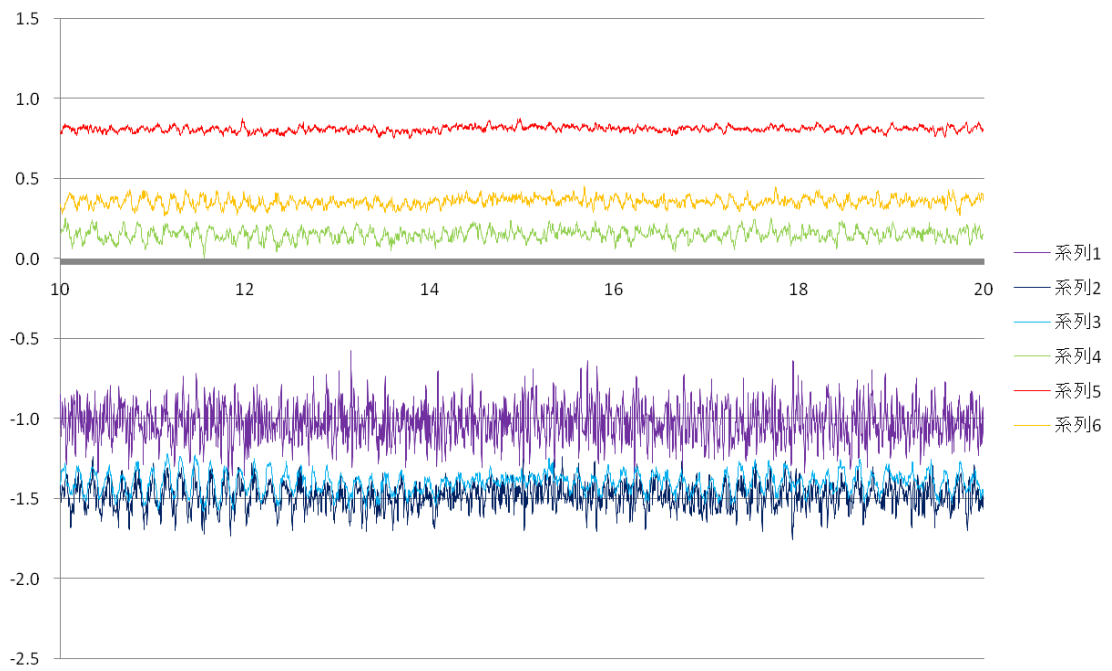


图 7.8 p350\_case000\_10

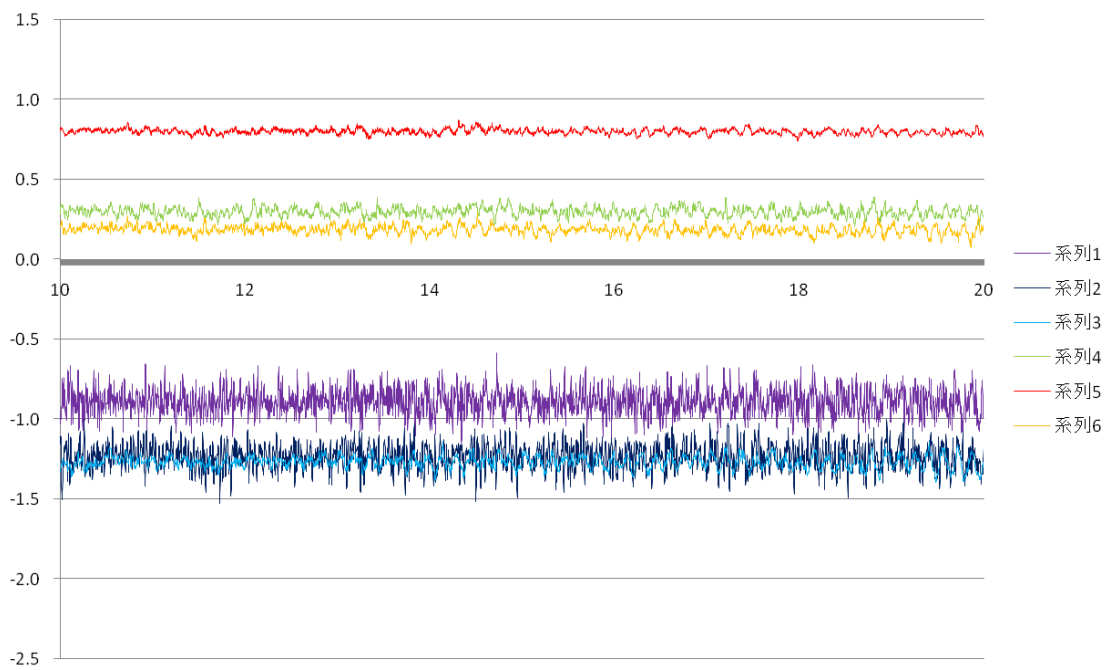


图 7.9 p350\_case000\_15

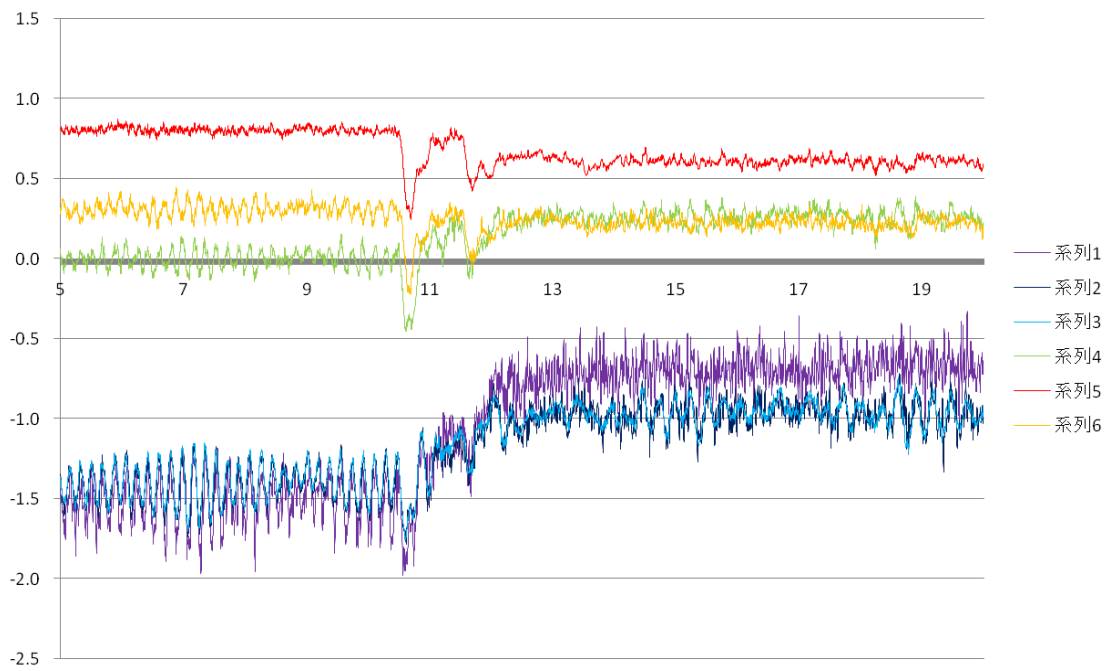


图 7.10 p350\_case002

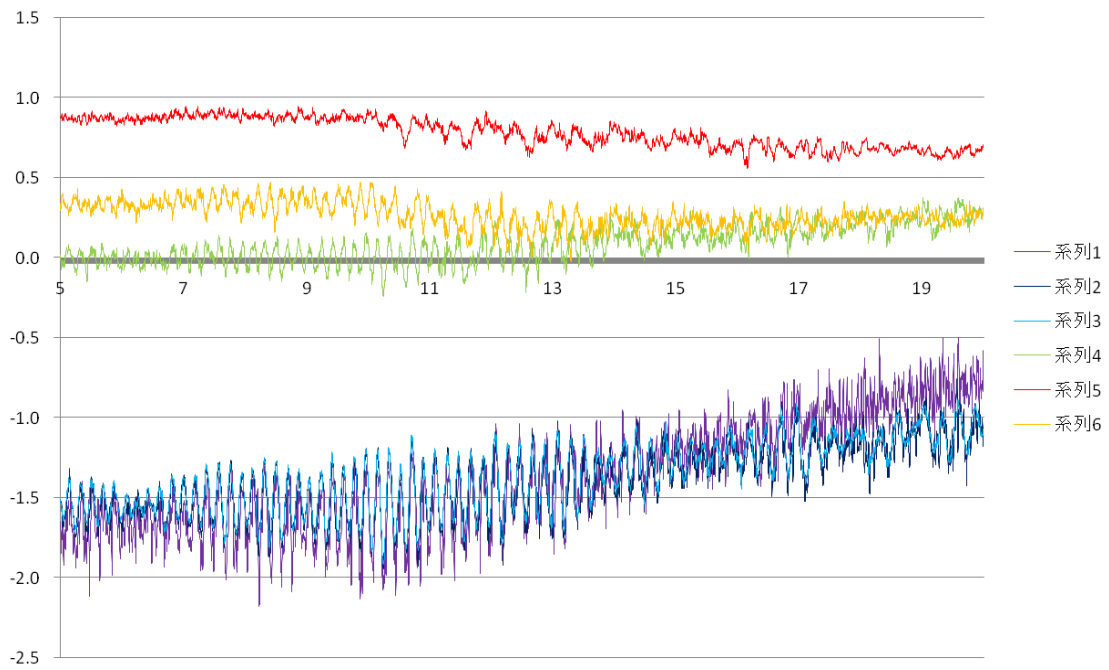


图 7.11 p350\_case002\_10

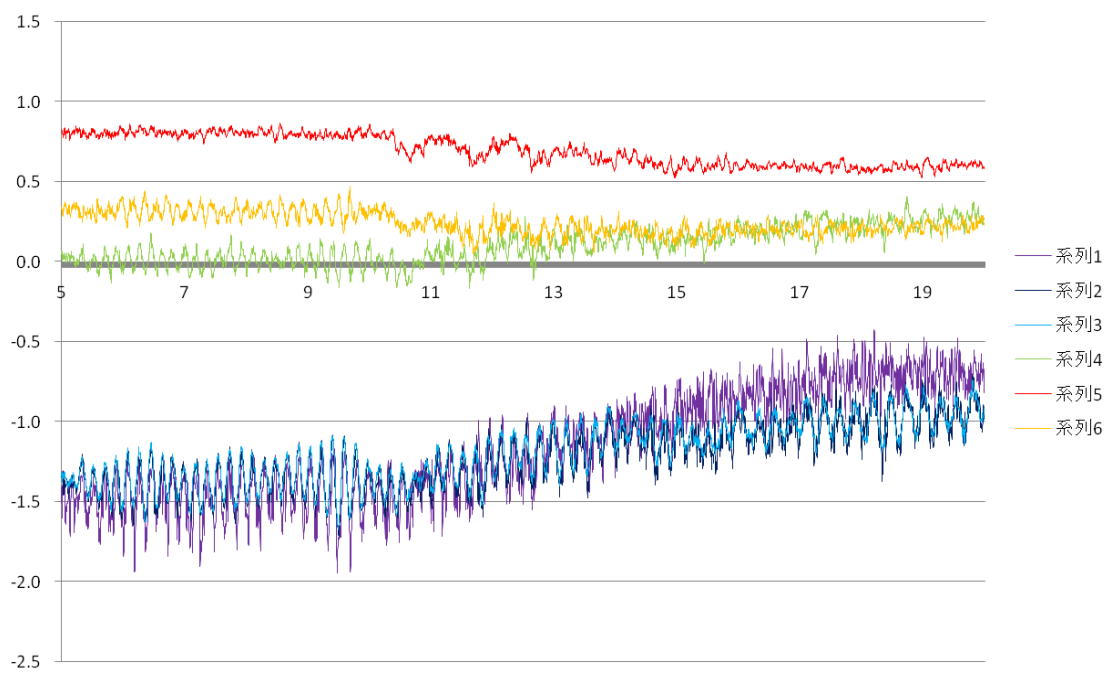


图 7.12 p350\_case002\_10c

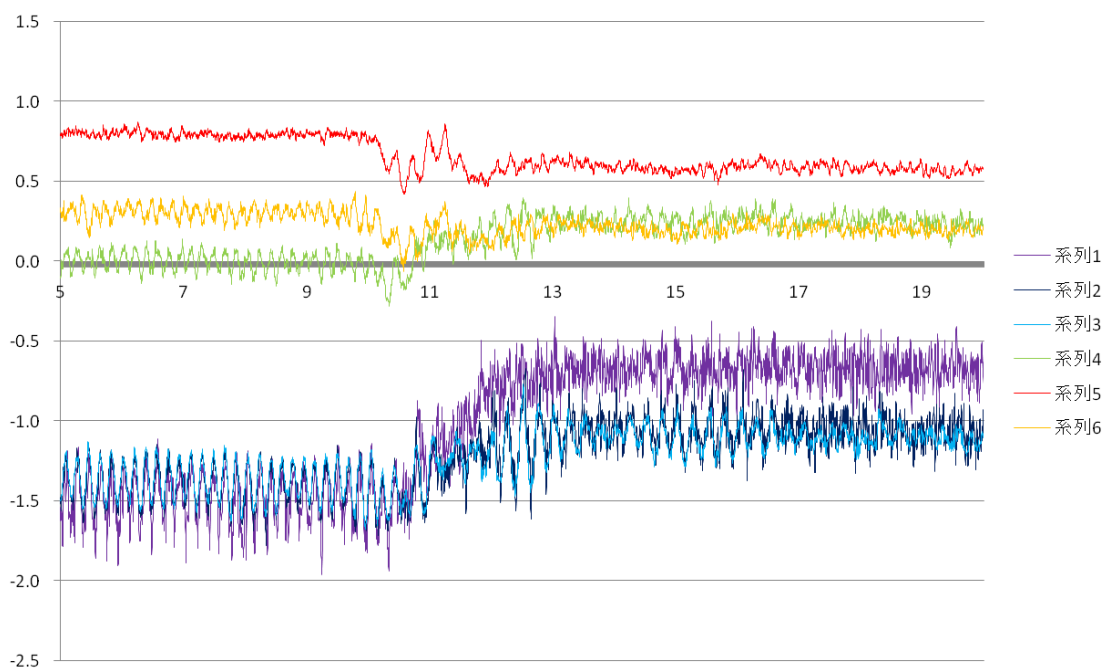


图 7.13 p350\_case002A

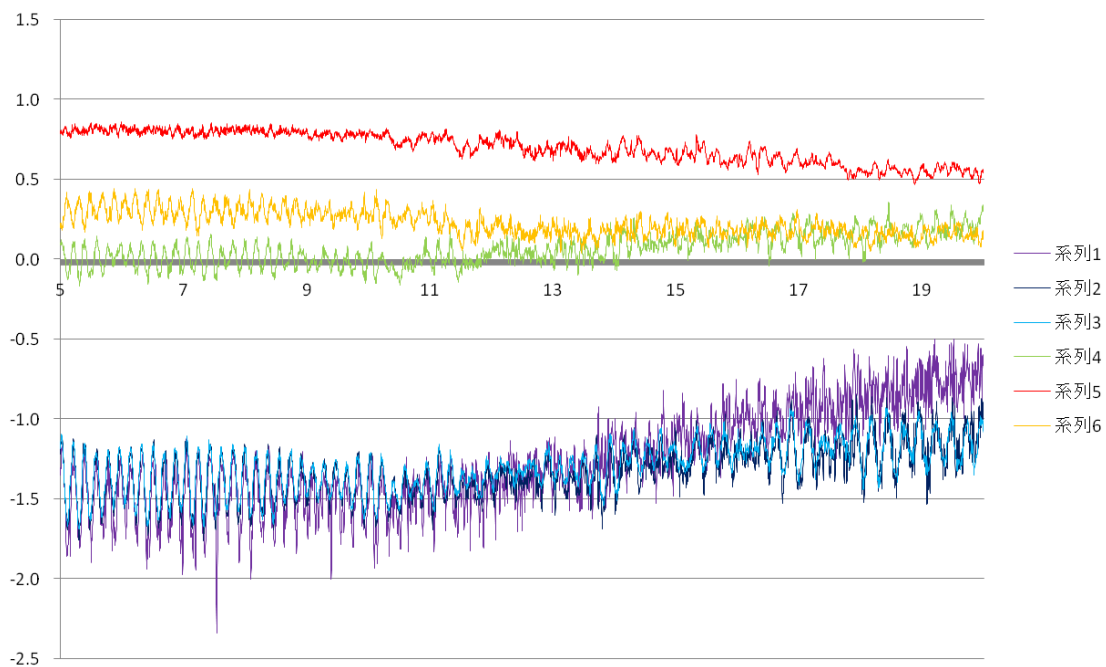


图 7.14 p350\_case002A\_10

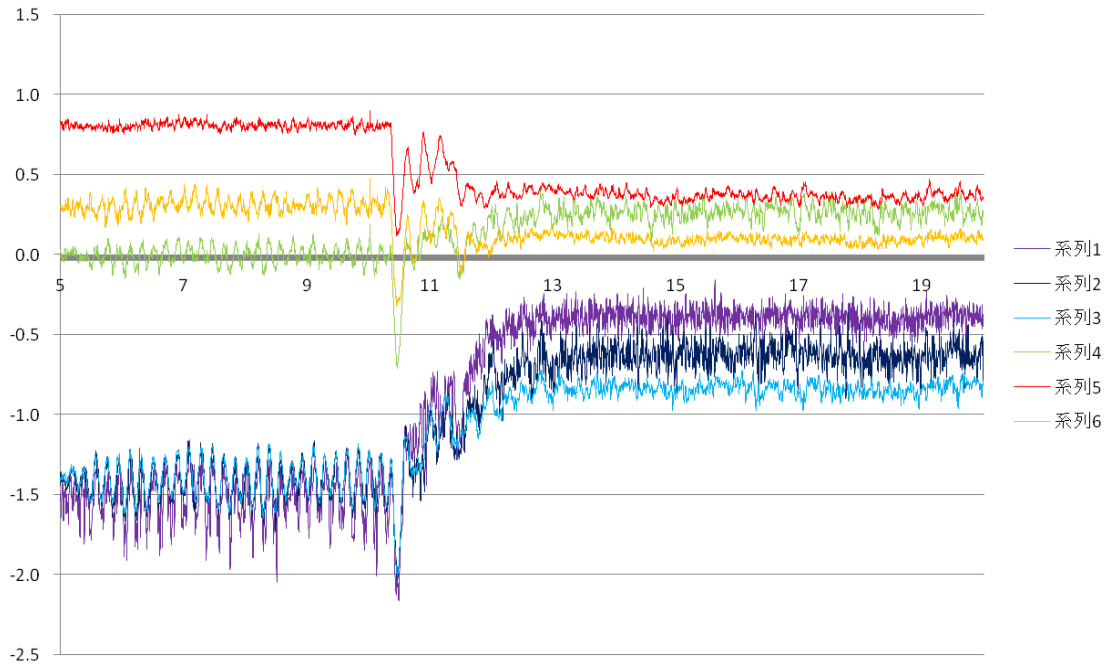


图 7.15 p350\_case002B

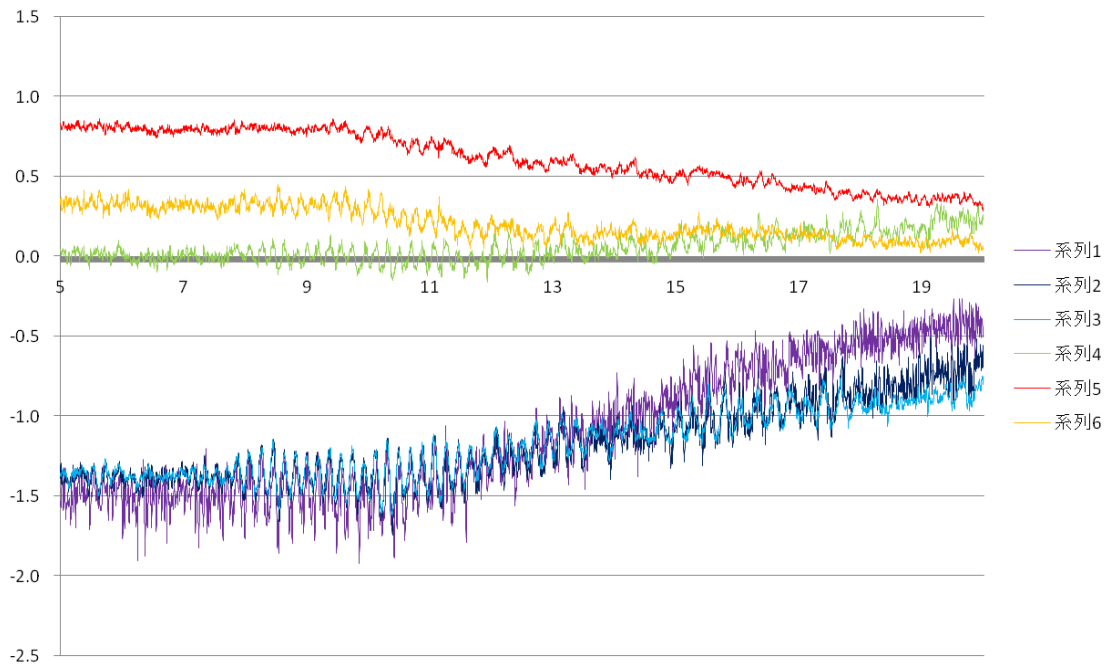


图 7.16 p350\_case002B\_10



(2) ピトー管が 400mm の場合

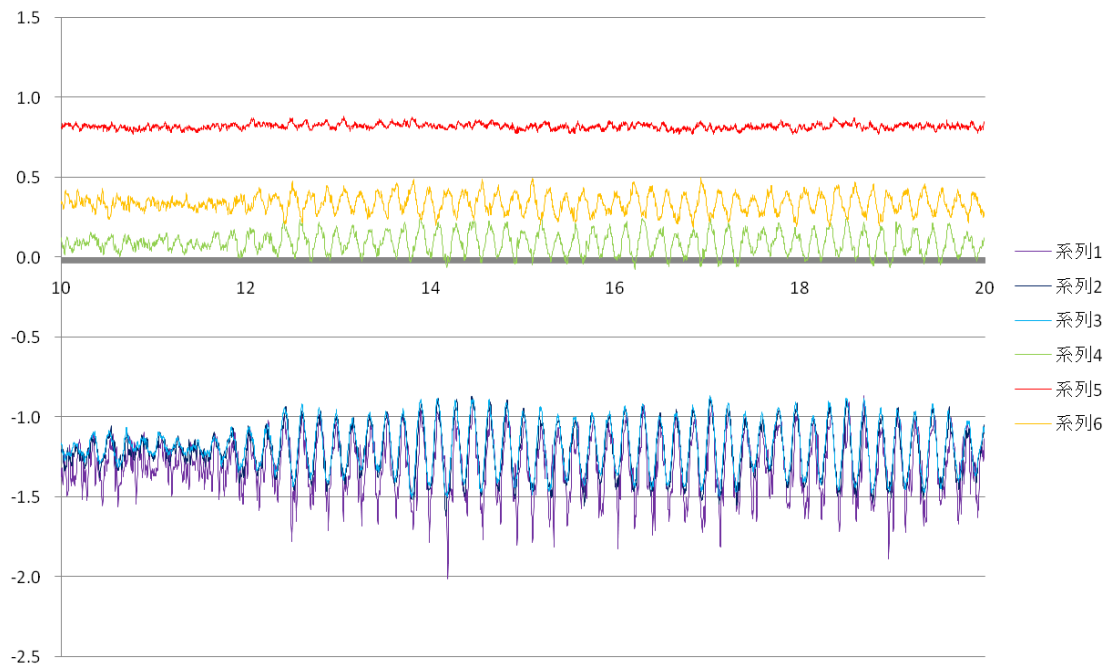


図 7.17 p400\_case000

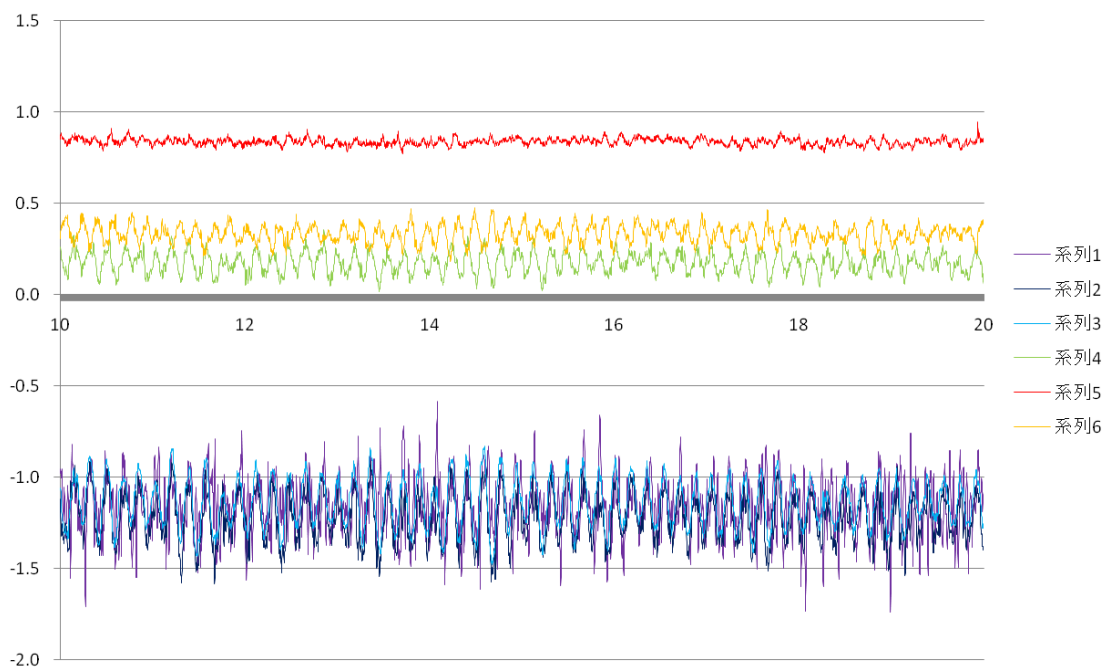


图 7.18 p400\_case000\_5

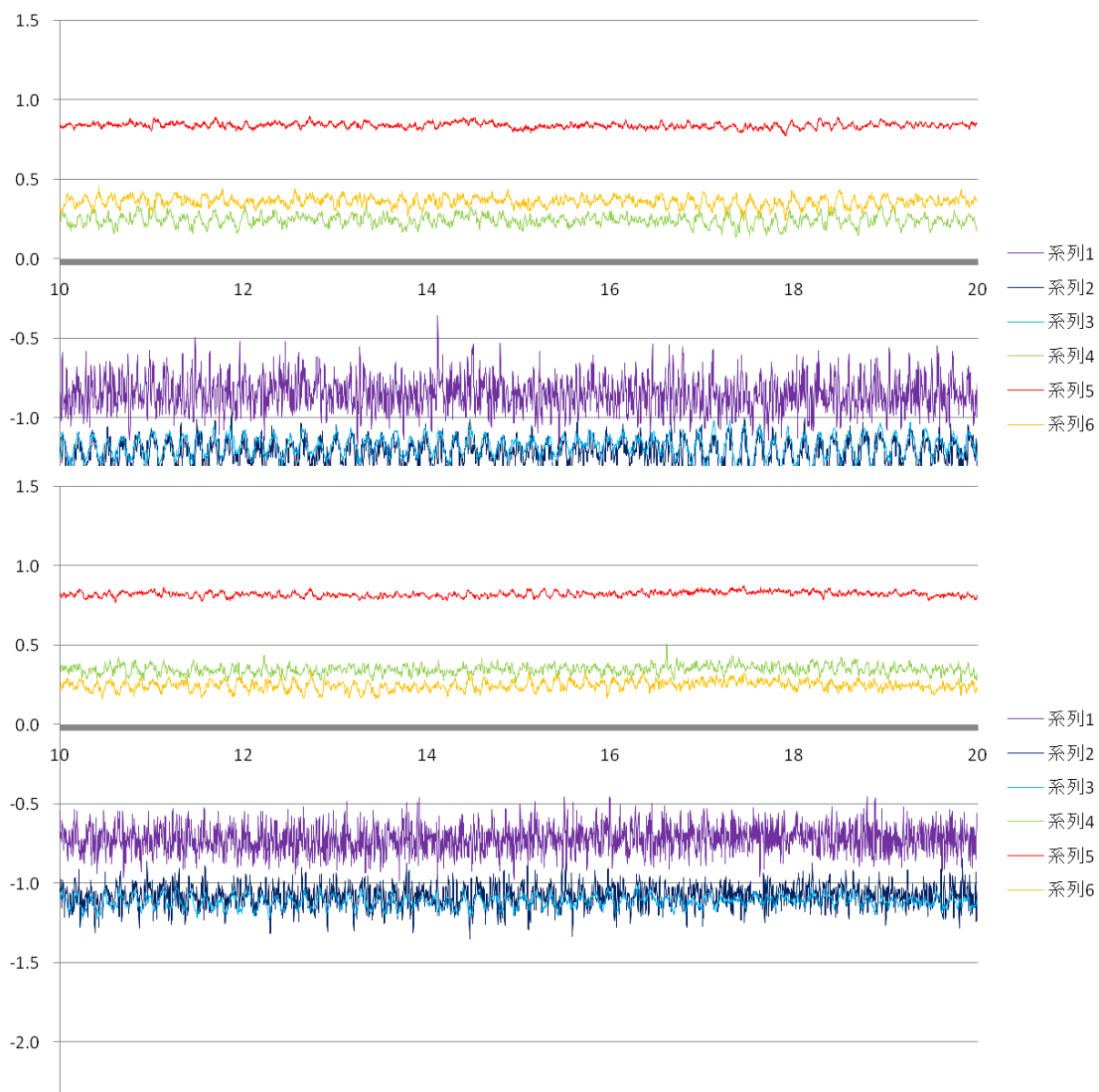


图 7.20 p400\_case000\_15

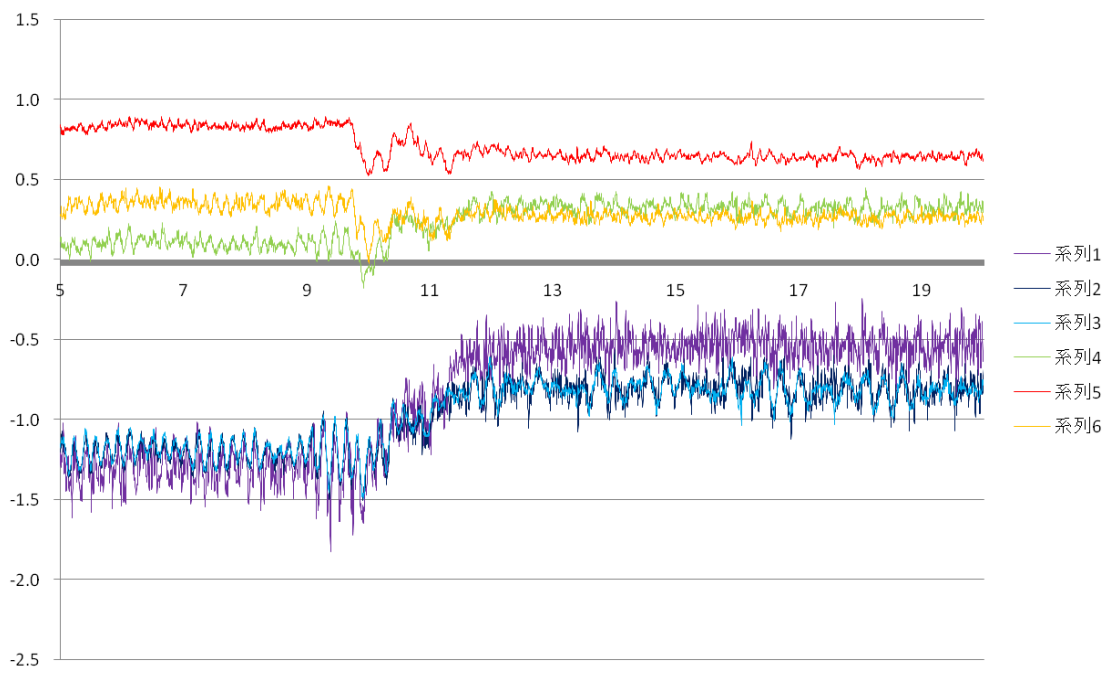


图 7.21 p400\_case002

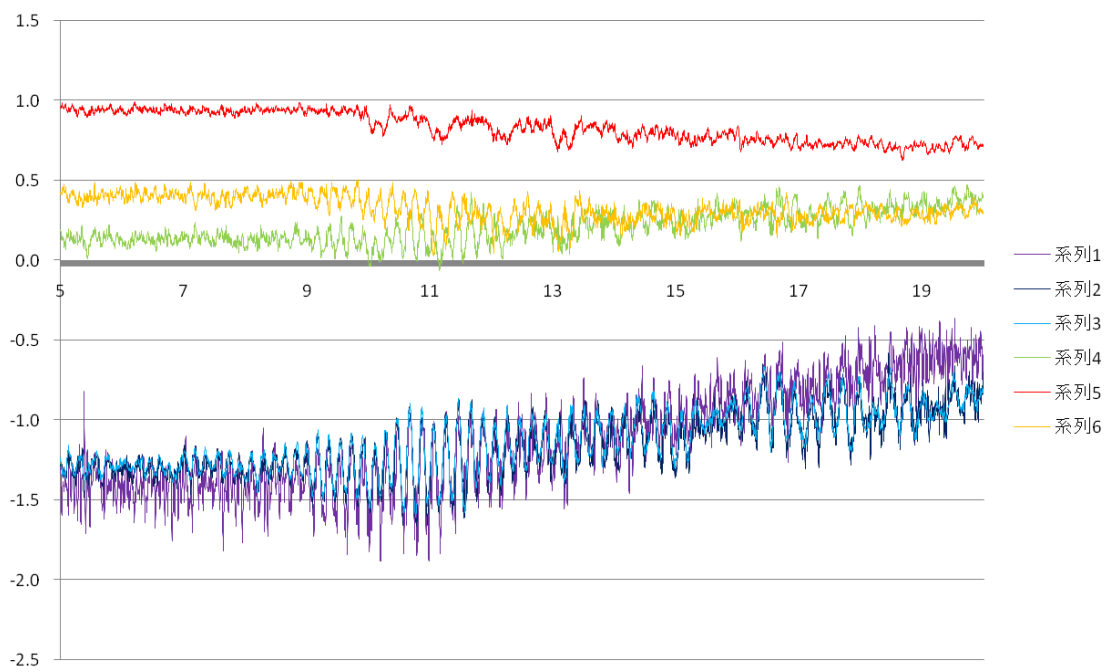


图 7.22 p400\_case002\_10

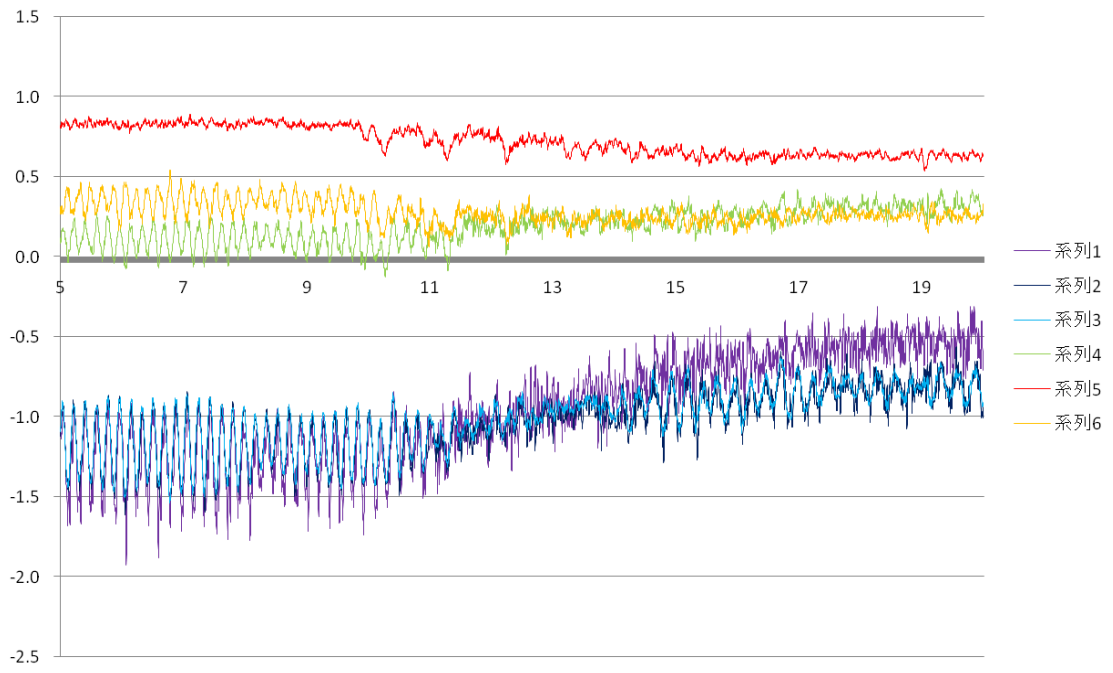


图 7.23 p400\_case002\_10c

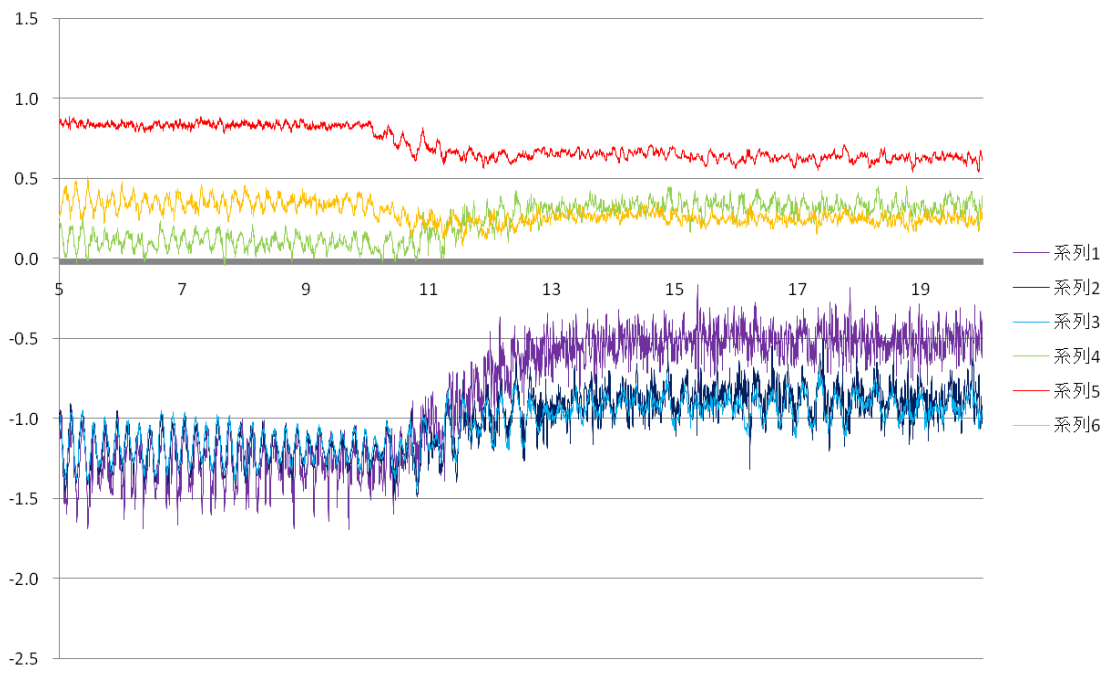


图 7.24 p400\_case002A

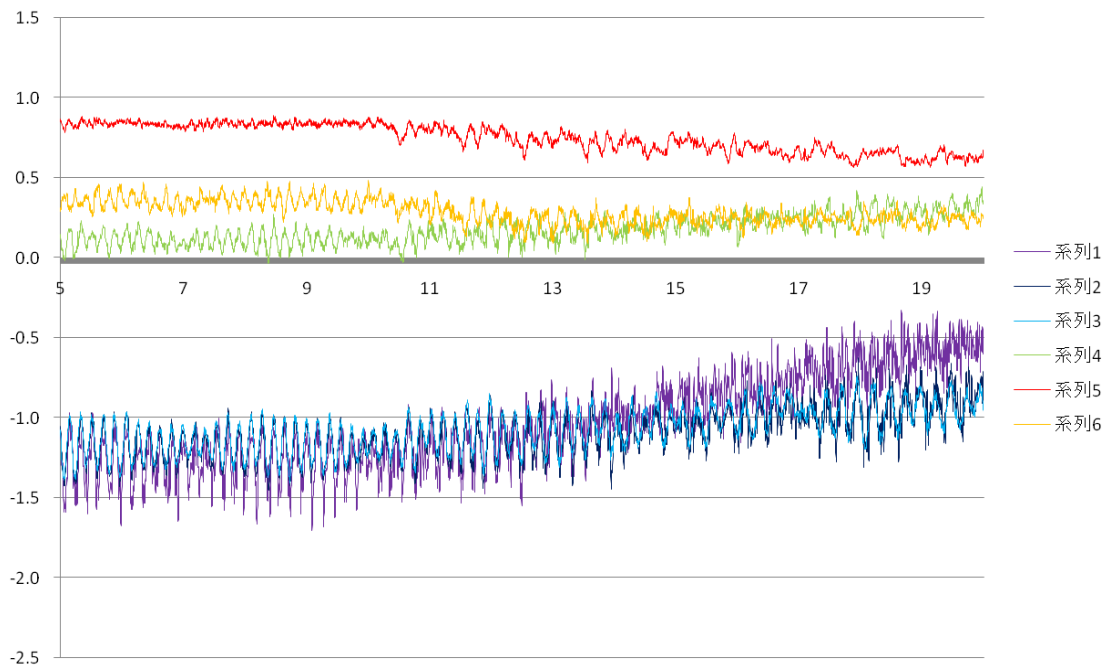


图 7.25 p400\_case002A\_10

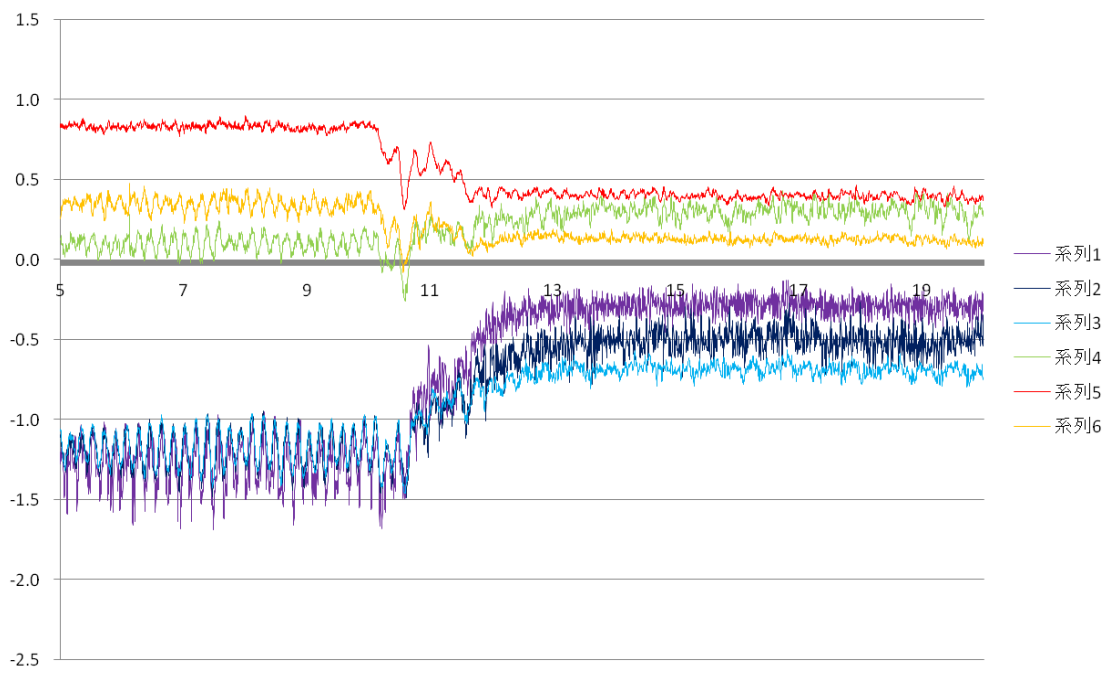


图 7.26 p400\_case002B

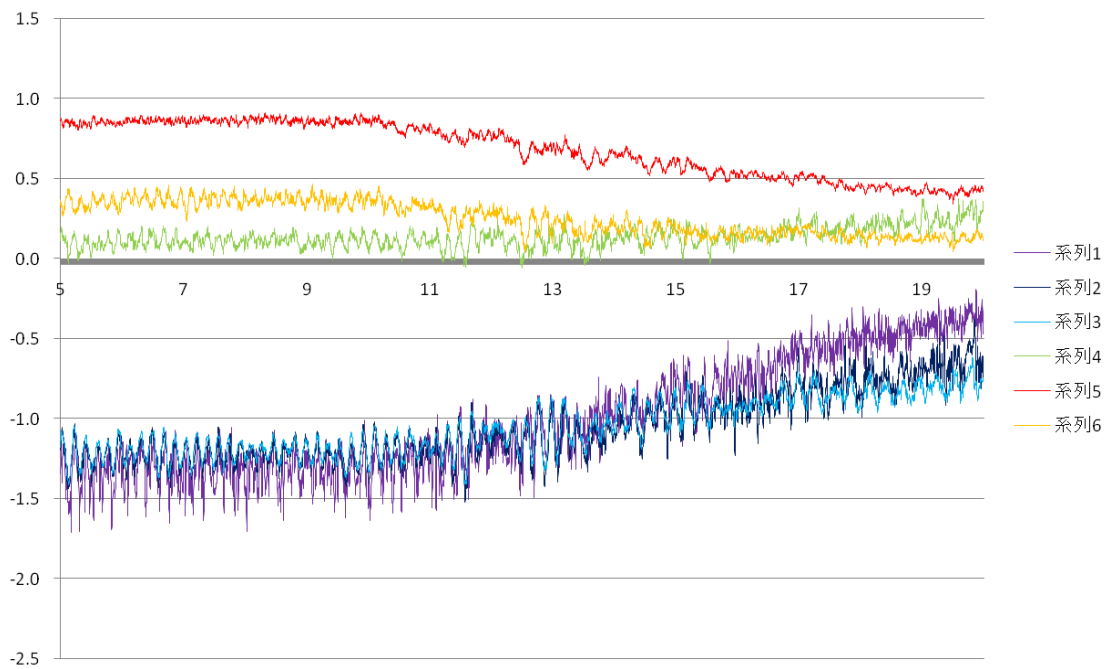


图 7.27 p400\_case002B\_10

### (3) ピトー管が 500mm の場合

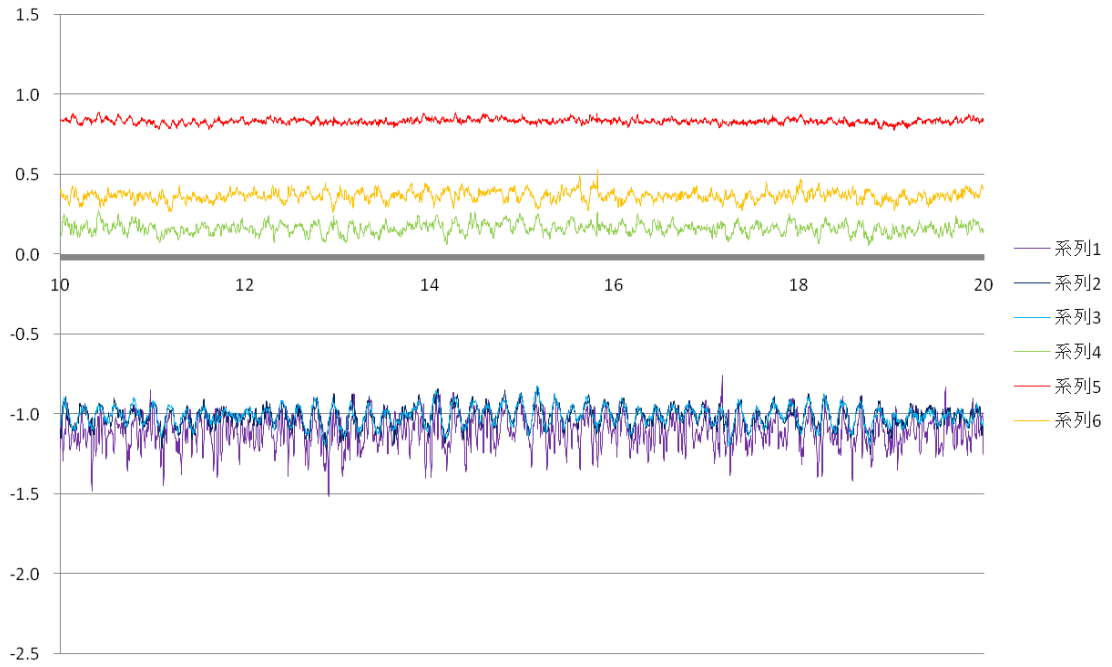
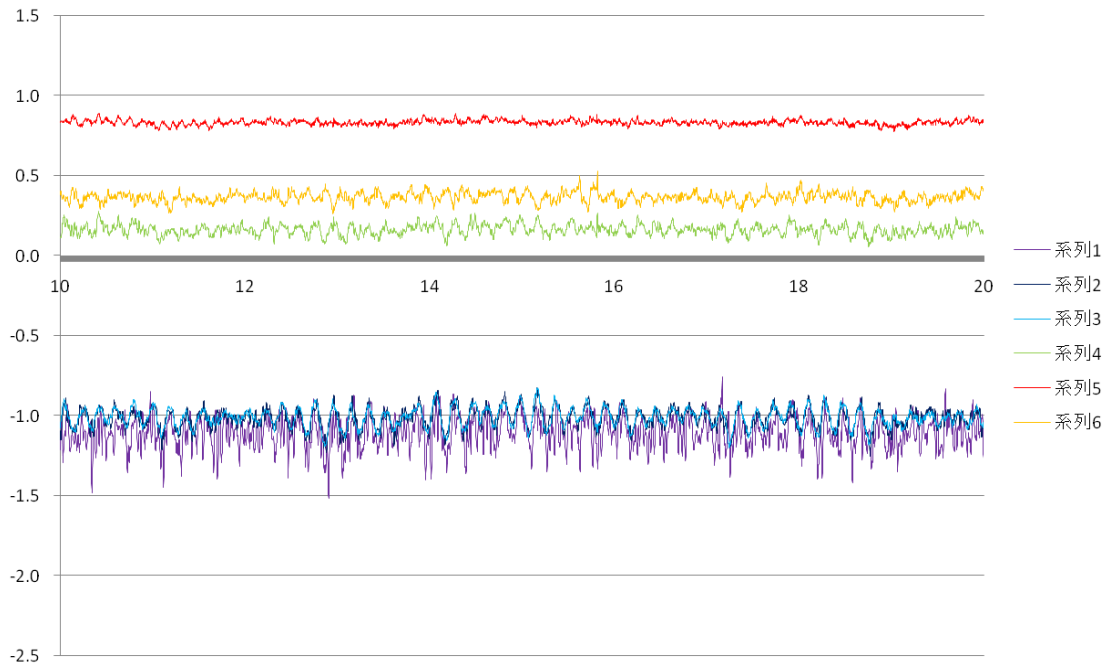


図 7.28 p500\_case000



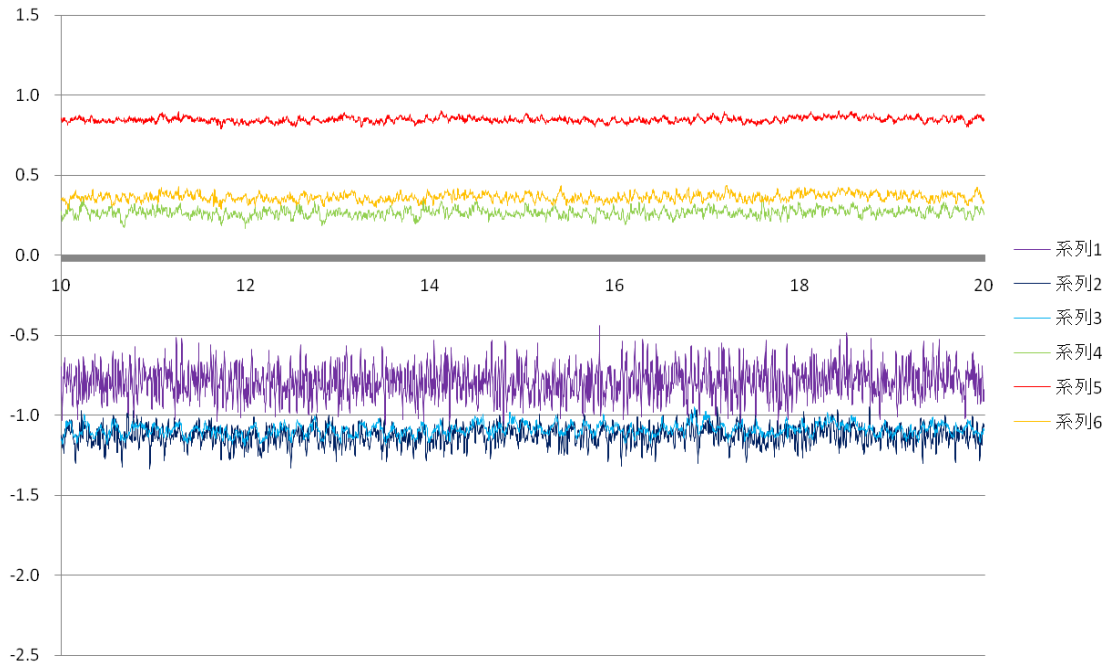


图 7.30 p500\_case000\_10





图 7.32 p500\_case002

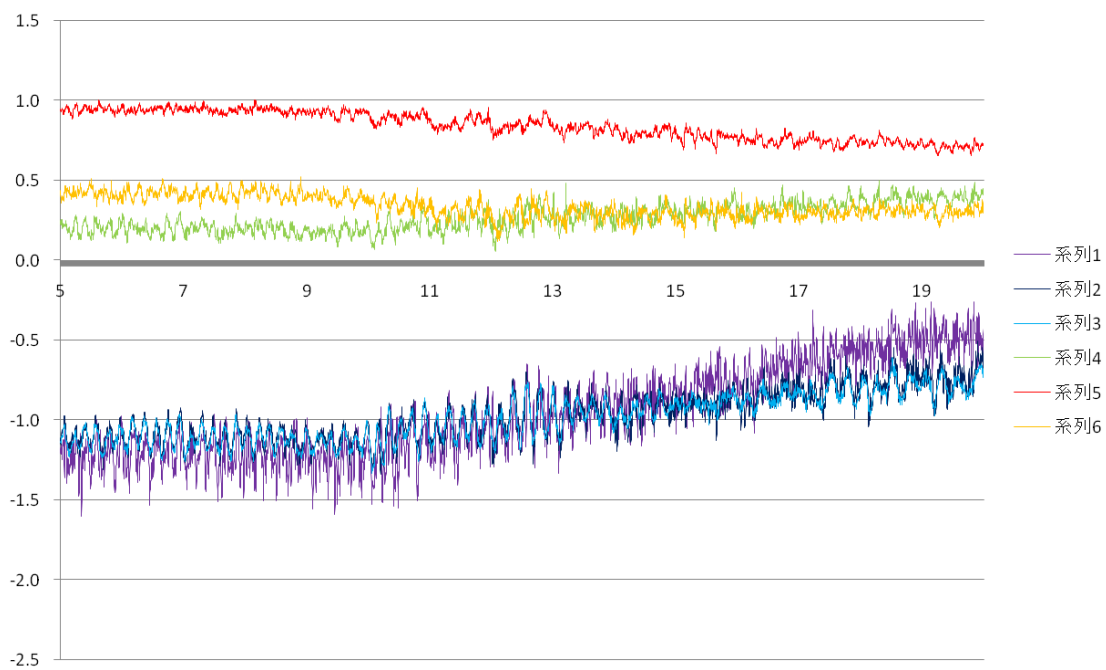


图 7.32 p500\_case002\_10

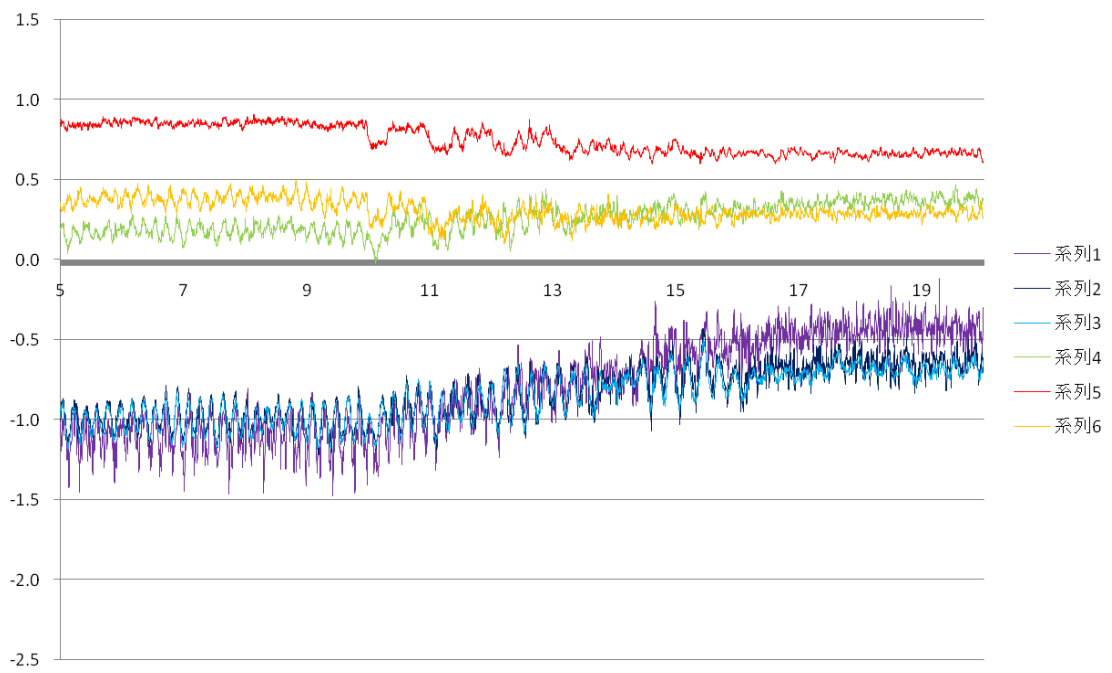


图 7.33 p500\_case002\_10c

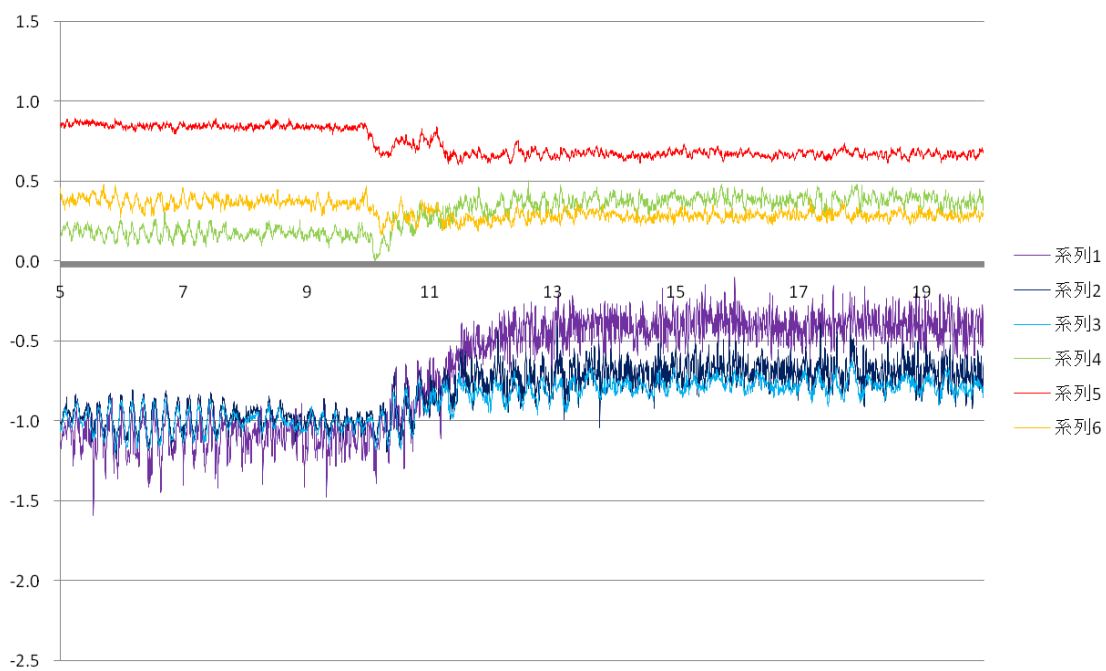


图 7.34 p500\_case002A

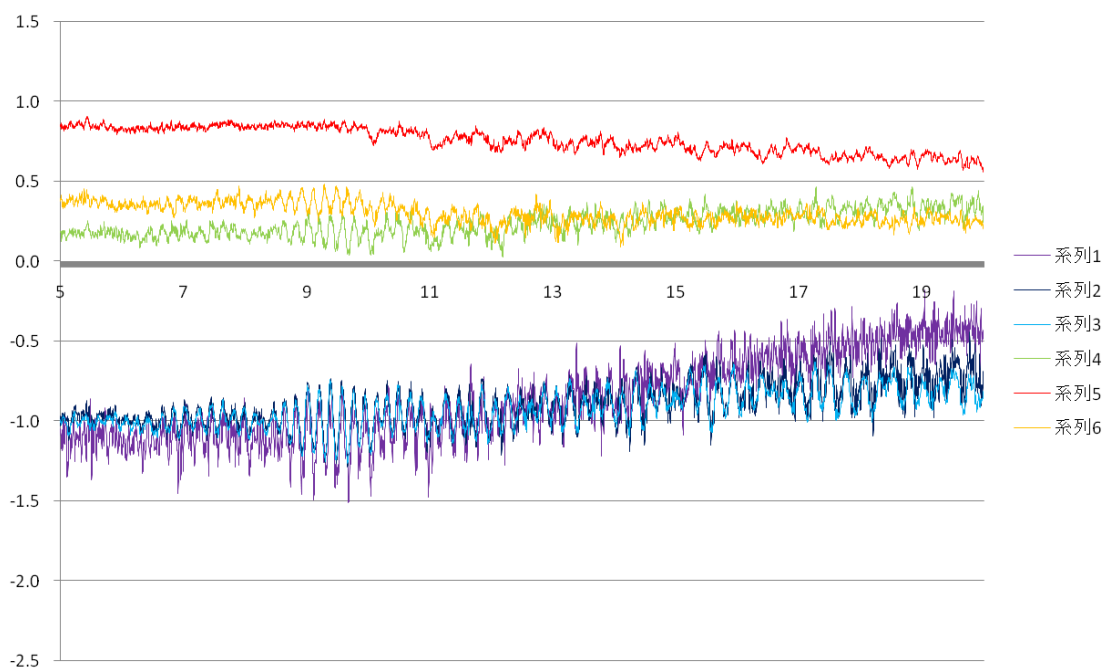


图 7.35 p500\_case002A\_10

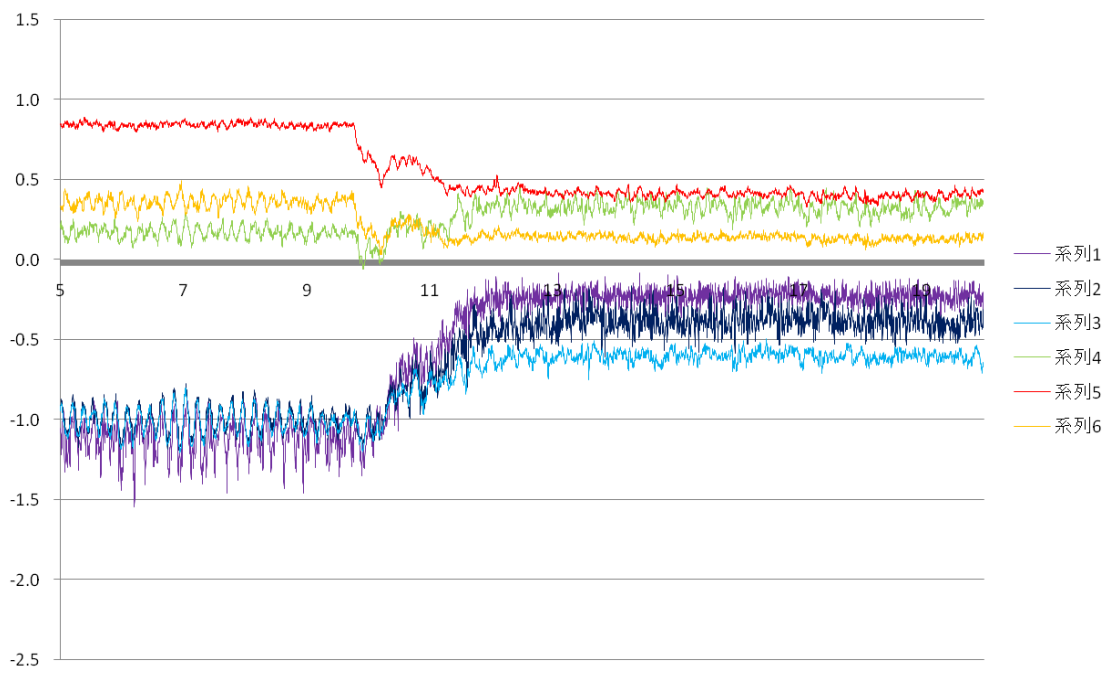


图 7.36 p500\_case002B

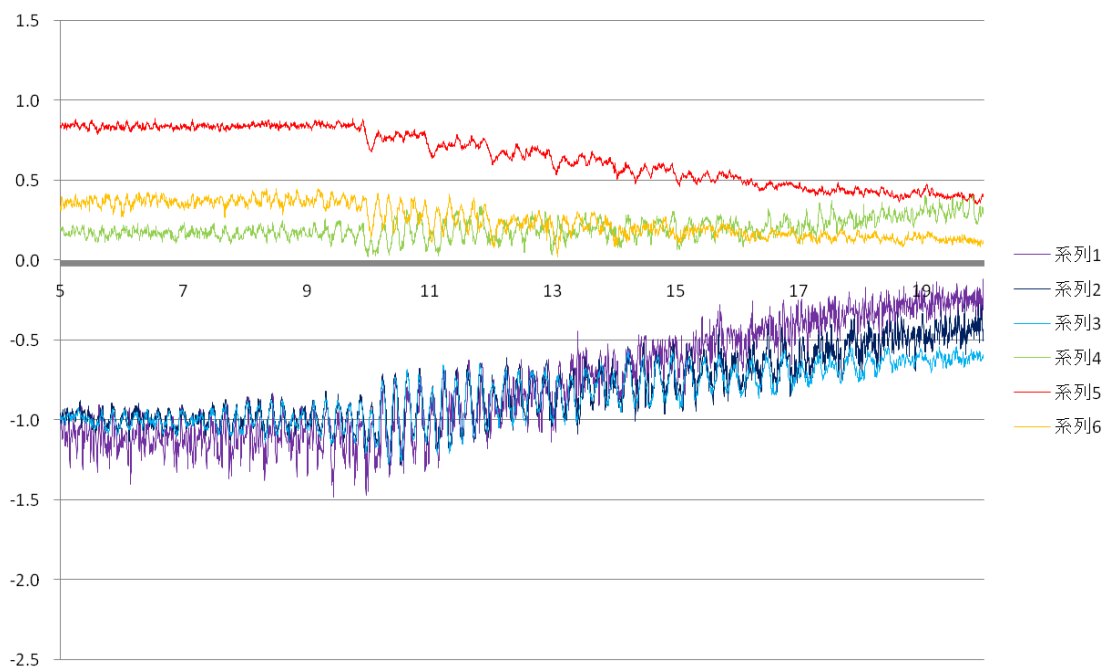


图 7.37 p500\_case002B\_10