

2002 年度修士論文

並列円柱の
ウェーク・ギャロッピングと非定常圧力

2003 年 1 月

指導教員 藤澤伸光 教授

高知工科大学大学院基盤工学科専攻

社会システム工学コース 1055161

八木 悟

Abstract

Wake Galloping of Tandem Circular Cylinders and Unsteady Pressure

YAGI Satoru

The experimental study on the wake galloping of tandem circular cylinders is reported in this paper. The free vibration test was conducted, in which only the leeward cylinder is supported elastically. Both steady and unsteady pressure measurements were also carried out.

The free vibration test reveals that the response of the leeward cylinder is influenced significantly by the spacing of two cylinders. In the case of narrow spacing ($2D$), two or three stable responsive amplitude are observed at the same wind speed, where D is the diameter of cylinder. On the other hand, in the case of wide spacing ($3D$, $4D$), the response is typical soft type galloping. The amplitudes increase with the wind speed monotonously.

The steady lift force is obtained, integrating the measured pressure. When the leeward cylinder is displaced upward, the downward lift is generated. In the case of $4D$ spacing, the lift increases monotonously with the displacement. The distribution of surface pressure suggests that this lift force is caused by the pressure gradient in the wake region of the windward cylinder. In the case of small spacing ($2D$, $3D$), in addition to the lift force caused by the wake, the sharp peaks are observed in the lift-displacement curve. These peaks are considered to be generated by the flow switching from the outer flow to the gap flow.

From the unsteady pressure, the aerodynamic damping is calculated. Concerning with some responses, the change of the sign in aerodynamic damping agrees well with the amplitude obtained from the free vibration test. However, it is also found that there are other stable responses which occur without the change in the sign of the aerodynamic damping. In other words, these vibrations cannot be translated by the traditional self excited vibration theory.

Thus, the new formulation of aerodynamic lift is attempted. Since the formulation is nonlinear, the response is affected by the initial conditions. However, the numerical results show that the stable limit cycle occurs under some initial condition, even if the damping is positive. Therefore, it can be said that there is a possibility of self excited vibration without negative aerodynamic damping.

Keyword: wake galloping, tandem circular cylinders, unsteady pressure, steady pressure,

論文要旨

並列円柱のウェーク・ギャロッピングと非定常圧力 Wake Galloping of Tandem Circular Cylinders and Unsteady Pressure

社会システム工学コース

1055161 八木 悟

1 研究背景と目的

近年、斜張橋の長大化に伴い、並列ケーブルを採用する斜張橋が増えている。並列ケーブルでは、上流側ケーブルの後流(ウエイク)の影響によって、下流側ケーブルが大振幅の振動(ウェーク・ギャロッピング)を起こすことが知られているが、ウェーク・ギャロッピングに対する一般的な設計法は確立していない。合理的な対処法確立のためには、現象とその発生メカニズムの正確な把握が急務である。

本研究では、ウェーク・ギャロッピング発生のメカニズム解明を目的として、並列円柱の自由振動実験並びに静的圧力(以下、定常圧力)、動的圧力(以下、非定常圧力)の測定実験を行った。

2 研究手順

既往研究によれば、ウェーク・ギャロッピングでは、下流側ケーブルの振動が重要であり、上流側ケーブルが固定された状態でも現象の本質は変わらないとされている。そこで、応答実験では下流側円柱のみ弾性支持して送風時の応答を観測した。実験パラメータは円柱間隔(2D・3D・4D の 3 ケース)と固有振動数(2 ケース)とした。(D: 円柱径)

定常圧力測定実験では、下流側円柱を上下に移動させ、下流側円柱の表面圧力分布を測定した。円柱の移動範囲は $-D < YD$ (一部の実験では $-1.25D < Y < 1.25D$)とした。

非定常圧力測定実験では、下流側円柱をサーボモータで加振し、定常振動状態における表面圧力を動的に測定した。実験パラメータは、円柱間隔(2D・3D・4D の 3 ケース)、風速(6 風速)、加振振幅($Y_a < 1D$: 12 ケース、一部の実験では $Y_a < 1.25D$: 15 ケース)とした。

なお、実験の結果、従来の空力振動に対する定式化では説明できない現象が認められたため、試みに非線形な空気力を仮定した数値解析を行い、定性的には、そのような空気力でも自励振動が発生することを確認した。

3 実験結果と考察

自由振動実験

間隔 2D の場合、同一風速において、2 つあるいは 3 つの応答振幅が同時に観測されるハード型応答を示した。また、この中の大振幅の振動は、無次元風速で整理される一般的な空力振動と異なって、実風速に支配される現象である可能性があるようにも思われた。間隔 3D と 4D の場合の応答振幅は、風速とともに単調に増加する典型的なソフト型応答であった。また、この応答特性は、無次元風速(円柱径と振動数で無次元化)で整理されることが分かった。

定常圧力測定

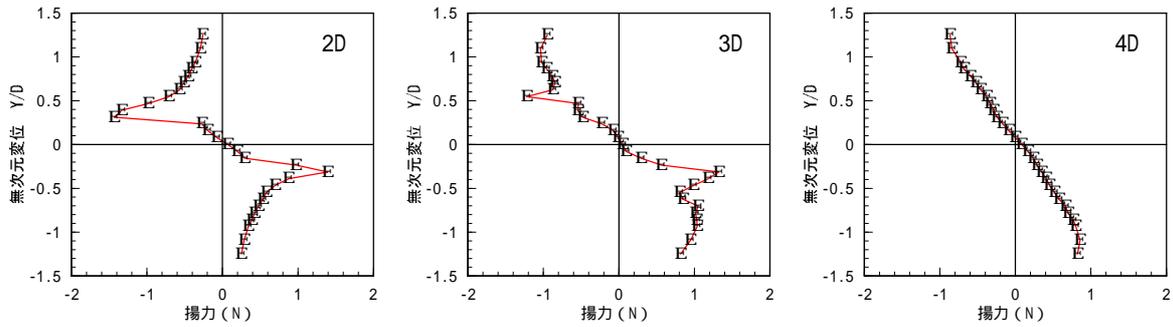


図1 揚力と変位の関係 風速 10.7m/s

図1に定常圧力測定から求めた定常揚力を示す。定常揚力の変化は円柱間隔によって著しく変化することが分かる。間隔4Dでは変位Yの増加とともに揚力は単調に減少している。しかしながら、Yが極めて大きくなった場合、揚力が0となることは自明だから、揚力が最小となる位置が測定範囲を超えていると考えられる。圧力分布を詳細に検討した結果、この揚力の原因は上流側円柱後流内の圧力勾配と考えられた。間隔2Dの揚力は、無次元変位0.3程度に顕著なピークが現れることが特徴である。同様に圧力分布データから、このピークの原因は、両円柱の外側を回る流れが両円柱間に流れ込む流れ(ギャップフロー)に変化する場合に発生するよどみ点の正圧と、高速なギャップフローによる負圧にあることが推定される。また、間隔2Dでは後流の幅が狭いため、ピークを過ぎると、揚力の絶対値が減少して0に漸近するものと考えられる。間隔3Dの揚力は、2Dと4Dの両方の特徴を持つ中間的な特性を示す。

非定常圧力

非定常圧力から非定常揚力の速度比例成分を求めた。一般的な自励振動理論によれば、速度比例揚力と構造減衰力の和が正であれば減衰、負であれば発散となり、両者の和が負から正に変化する振幅が自由振動の応答振幅となるはずである。非定常揚力の測定結果と、自由振動実験結果を比較したところ、間隔2Dの中程度の振幅を示す応答、および3Dの応答については、両者はほぼ一致した。なお、揚力波形の考察から、空力負減衰(発散)の原因は流れの履歴効果(流れの遅れ)、ある程度振幅が大きくなった場合の正減衰の原因はギャップフローへのスイッチング時の揚力ピークによる揚力の位相進みにあることが分かった。

一方、間隔2Dの大振幅の応答や、4Dの応答に関しては、空力減衰と構造減衰の和の符号が変化しておらず、従来の自励振動理論では解釈できない。しかしながら、自由振動応答には強制振動的な特徴は一切認められず、応答から見る限り、自励振動の一種であるように思われる。

間隔2Dの大振幅および間隔4Dの励振メカニズム一解釈

非定常圧力測定の結果、間隔2Dの大振幅の応答や、4Dの応答に関しては、従来の自励振動理論で説明できないという結果が得られた。観測された現象を説明するためには、新しい空気力の定式化が必要となる。そこで非常に大胆ではあるが、間隔2D~4Dの非定常揚力の後流の圧力勾配に支配される部分をS字形の曲線とみなし、これを図2の破線で示した矩形状の揚力で近似してみた。すなわち、変位が正の時に対して負揚力の絶対値Aが、負の時には正揚力が作用するとした。

$$m\ddot{Y} + c\dot{Y} + kY = -\frac{Y}{Y}A$$

運動方程式に自由振動実験とほぼ等しい条件を入力し、数値計算を行った。この運動方程式は非線形であるから、初期条件などによって異なる応答が得られるが、ある条件の下では、自励振動的なりミット・サイクルが生じることが分かった。結果の一例を図3に示す。ここで導入した揚力は測定結果に基づくものではないから、定量的に現象を説明できるわけではない。しかしながら、従来の空気力の遅れ(速度比例成分)による負減衰がなくとも自励振動が生じることが説明されたと言えよう。

4 結論

自由振動応答、揚力とも円柱間隔によって大きく変化する。

間隔 2D の中振幅の応答や、3D の応答は自励振動理論で説明できる。発散の原因は、一般的な空力不安定現象と同様に流れの遅れであり、振幅を定める正減衰は流れのスイッチングによって発生する。

間隔 2D の大振幅の応答や 4D の応答は、従来の自励振動理論では説明できない可能性が高い。矩形的に変化する揚力を仮定した解析によれば、空力負減衰がなくとも、自励振動的な振動が発生することが分かった。

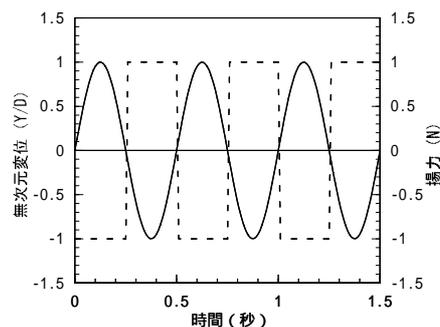


図2 仮定された揚力

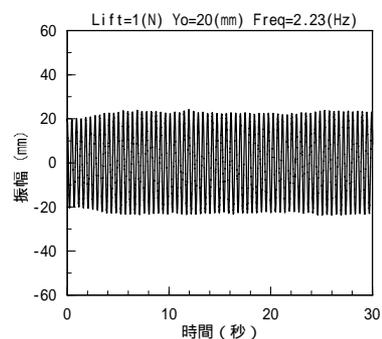


図3 数値解析結果

目次

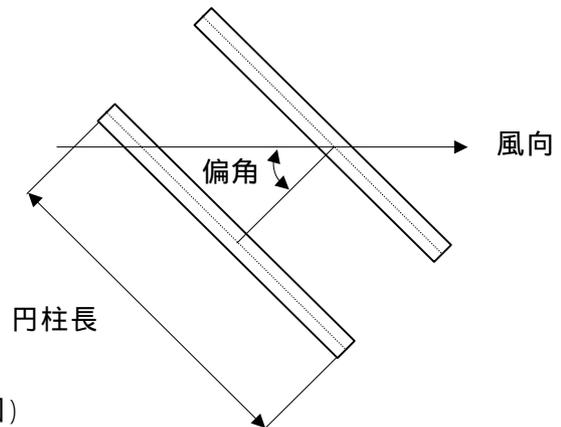
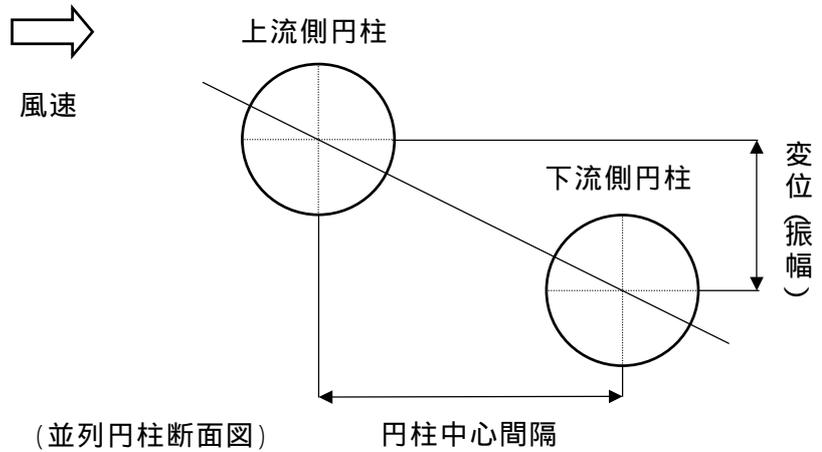
1 はじめに	3
1.1 研究の背景	3
1.2 既往の研究	3
1.3 研究の目的	3
2 自由振動応答特性	4
2.1 実験の概要	4
2.2 実験方法	4
2.3 応答測定結果	5
2.4 応答特性のまとめ	7
3 定常圧力特性	8
3.1 実験の概要	8
3.2 実験方法	8
3.3 定常圧力測定結果	9
3.3.1 測定圧力の対称性	9
3.3.2 測定圧力の特徴	11
3.3.3 定常揚力	15
3.3.4 準定常揚力	17
3.4 定常圧力特性のまとめ	18
4 非定常圧力特性	19
4.1 実験の概要	19
4.2 実験方法	19
4.3 非定常圧力測定結果	21
4.3.1 非定常揚力と自由振動応答特性との整合性	21
4.3.2 非定常圧力と安定性について	26
4.3.3 間隔 2D での大振幅振動に関する一解釈	31
4.4 非定常圧力特性のまとめ	35
5 結論	36
6 今後の課題	37
7 付録	38
参考文献	74

記号と用語

- D : 円柱径
- d : 円柱間隔
- Y : 変位 (振幅)
- Y/D : 無次元変位 (振幅)
- V : 風洞風速
- Vr : 無次元風速
- F : 固有振動数

$$Vr = \frac{V}{FD}$$

- m : 質量
- k : ばね定数
- C : 粘性抵抗係数
- ρ : 空気密度
- B : 円柱長
- n : 圧力孔数
- L : 隣接圧力孔円弧長
- l : 圧力孔位置
- Cp : 圧力係数
- Cpr : 変位比例圧力係数
- Cpi : 速度比例圧力係数
- ci : 空力粘性抵抗係数
- Cr : 空力復元力係数



自励振動理論に基づいた構造系と非定常揚力の運動方程式

$$m\ddot{Y} + C\dot{Y} + kY = \frac{1}{2}\rho V^2 B \Delta L \sum_{j=1}^n C_{pj} \sin(\theta_j)$$

非定常揚力を速度比例成分と変位比例成分に分離

$$m\ddot{Y} + C\dot{Y} + kY = \frac{1}{2}\rho V^2 B \Delta L \sum_{j=1}^n (C_{prj} Y + C_{pij} \dot{Y}) \sin(\theta_j)$$

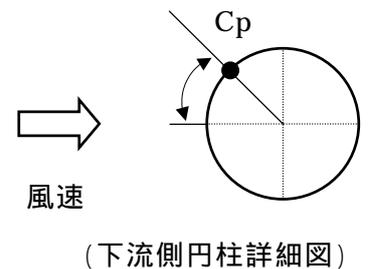
$$m\ddot{Y} + C\dot{Y} + kY = \frac{1}{2}\rho V^2 B \Delta L \sum_{j=1}^n C_{prj} \sin(\theta_j) Y + \frac{1}{2}\rho V^2 B \Delta L \sum_{j=1}^n C_{pij} \sin(\theta_j) \dot{Y}$$

次の記号を代入

$$C_i = \frac{1}{2}\rho V^2 B \Delta L \sum_{j=1}^n C_{pij} \sin(\theta_j) \quad ; \quad C_r = \frac{1}{2}\rho V^2 B \Delta L \sum_{j=1}^n C_{prj} \sin(\theta_j)$$

自励振動理論を定量的に求める運動方程式

$$m\ddot{Y} + (C - C_i)\dot{Y} + (k - C_r)Y = 0$$



1 はじめに

近年、斜張橋の長大化に伴い、複数本のケーブルを採用する斜張橋が増えている。並列ケーブルでは、上流側ケーブルの後流(ウエイク)の影響によって、下流側ケーブルが大振幅の振動(ウェーク・ギャロッピング)を起こすことが知られているが、ウェーク・ギャロッピングに対する一般的な設計法は確立していない。合理的な対処法確立のためには、現象とその発生メカニズムの正確な把握が急務である。

ウェーク・ギャロッピングの発現風速は、従来知られている空力振動と異なり、無次元風速で整理できない可能性があるとの指摘もあるため¹⁾、振動応答特性を改めて把握することを目的に、現象が発現しやすい条件¹⁾において自由応答振動実験を実施する。そして、ウェーク・ギャロッピング発生のメカニズム解明を目的として、並列円柱の静的圧力(定常圧力)、および動的圧力(非定常圧力)の測定実験を行うこととした。

2 自由振動応答特性

2.1 実験の概要

既往の研究の研究成果によれば、ウェーク・ギャロッピングの振動応答特性に影響を及ぼす主要なパラメータは、円柱間隔、迎角と偏角、気流の乱れなどである。本実験では、これらのパラメータに対して最も現象が発現し易い条件を設定し、2次元模型による自由振動実験を実施した。実験の目的は、既往の研究との比較および振動応答特性の把握である。

2.2 実験方法

実施した実験は、上流側円柱は固定とし下流側円柱のみを弾性支持した2次元模型によるたわみ1自由度実験である。両円柱は迎角、偏角ともに 0° とし、風洞内に平行かつ水平に配置した。自由度方向は風向直角方向である。配置図を図1に示す。

ケーブル模型には、外径(D)32mm、円柱長790mmの市販アルミ製パイプを使用した。表面はアルミの地肌のままであり、特別な加工・処理等は施していない。スパン500m程度の鋼斜張橋ケーブルを想定して、単位長さ当たり質量は2.6kg/mに設定した。付加減衰は特に与えていない。質量・減衰パラメータは約70であった。円柱間隔(d)は2D、3D、4Dの3ケースとした。間隔は上流側円柱を移動させて調整した。また、現象が無次元風速に支配されるか否かを調べるために、固有振動数を2段階に変化させて実験を行った。実験気流は一様流である。基本的な実験条件を表1に示す。

実験では、特に加振減衰器などは用いず原則として風速を増加させながら自由振動応答を測定した。ただし、一部の不安定なリミットサイクルが存在するケースでは、手動で加振した。応答の測定は、振動が安定してから光学式変位計によって得られた値をフーリエ変換して、各風速に対する振動応答振幅と振動数を求めた。サンプリング数は1024個、サンプリング周波数は12.8Hzである。

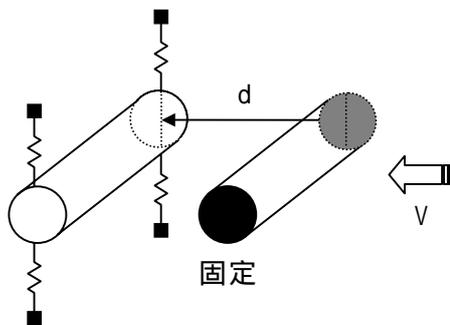


図1 自由振動実験 配置図

表1 自由応答実験 実験条件

実験ケース	C1	C2
円柱径 D (mm)	32	
円柱長 (mm)	790	
固有振動数 (Hz)	2.51	3.22
対数減衰率	0.0038	0.0034
質量・減衰パラメータ	76.11	68.66
円柱間隔	2D	3D 4D
実験風速 (m/s)	0.5 ~ 12	
レイノルズ数	~ 2.6×10^4	

2.3 応答測定結果

円柱の応答と風速の関係を図 2、3 に示す。両図とも同じ実験結果をプロットしたものであるが、図 2 の横軸は無次元風速、図 3 の横軸は風洞風速である。また、縦軸はいずれも円柱径で無次元化した応答振幅である。図から一見して明らかなように、対風応答特性は円柱間隔によって大きく変化する。なお、測定した振動数は風速の増加に伴って若干の変化することが観測されたが、その変化は極めて微小であったため結果は省略する。

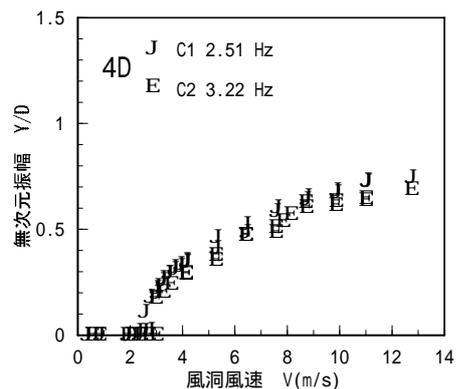
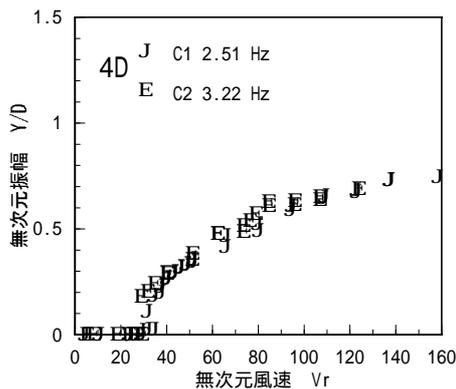
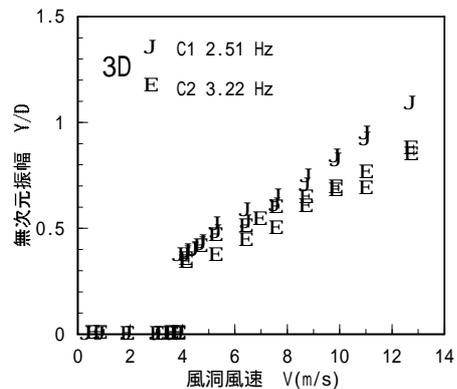
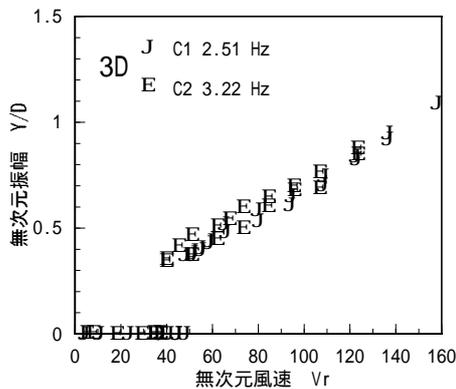
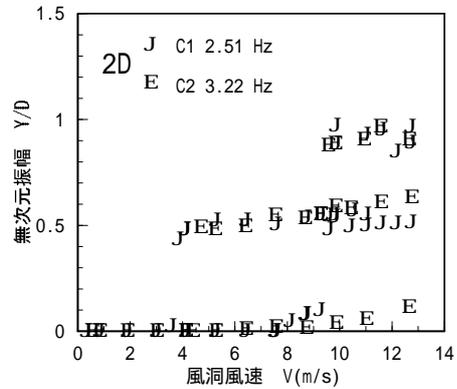
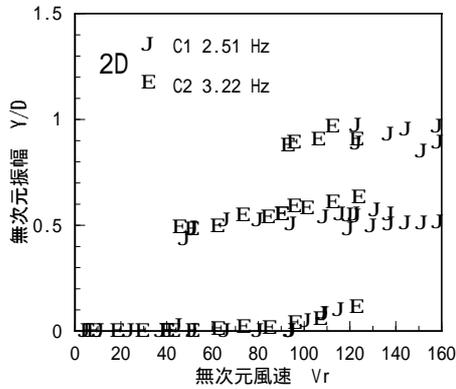


図 2 無次元風速と応答

図 3 風洞風速と応答

間隔 3D、4D の場合

間隔 3D、4D では振幅は風速とともに単調に増加し、いわゆるソフト型の応答を示す。実験では、風速を徐々に増加させながら応答を測定した後、実験最大風速から風速を減少させながら振動が停止するまでの応答も測定した。図には風速増加時の応答と減少時の応答を区別せずにプロットしてあるが、実験時の観測によれば、発振風速より停止風速の方が若干低いようである。間隔 3D における発振(停止)風速は 4m/s 程度、間隔 4D では 2m/s 程度であった。なお、間隔 3D では、振動応答振幅は風速とともにほ

ば直線的に増加し、実験風速内では最大応答が求められていないのに対して、間隔 4D では風速 9m/s 付近から増加率が鈍り、一定値に収束するような傾向が見られる。

間隔 3D の場合について図 2 と図 3 を比較すると、風洞風速で整理した場合、固有振動数の異なる 2 つの実験の振幅にかなりの差が認められるのに対して、無次元風速で整理すると両実験の結果はよく一致する。従って、この場合のウェーク・ギャロッピング応答特性は無次元風速に支配されると考えるのが妥当である。発振(停止)風速に関しては、風洞風速で整理した方が両実験の結果が一致するように見えないこともないが、実験精度などを考えれば速断はできない。間隔 4D の場合も定性的には同様である。

間隔 2D の場合

間隔 2D では、同一風速において 2 個、あるいは 3 個の振幅が観測される典型的なハード型応答が生じた。したがって、この場合の空気力は極めて複雑な振幅非線形性を有するものと考えられる。

図 3 の間隔 2D、固有振動数 2.51Hz の場合に生じた現象について説明する。低風速から徐々に風速を増加させると、風洞風速 8m/s 付近から微小な振動が発生する(小振幅)。この振動の振幅は風速の増加とともに漸増するが、振幅は 0.1D 以下と小さい。更に風速を増すと、風洞風速 9.5m/s 付近で無次元振幅約 0.6 の振動に遷移する(中振幅)。この状態で風速を増加させても振幅はほとんど変化しない。また、逆に風速を減少させた場合も、振動停止風速(約 4m/s)まで振幅はほぼ一定である。停止風速を超えて風速を低下させると初期の振動停止状態に戻る。一方、中振幅の発振風速である 9.5m/s 以上の風速で手動加振を行うと、無次元振幅約 1 弱の大振幅の振動が現れる。この振動も風速変化に対して振幅はほぼ一定である。大振幅振動が生じている状態で風速を低下させると、約 9.5m/s で振動は停止し、中振幅振動に遷移する。この大振幅の停止風速は、中振幅の発振風速にほぼ等しいが、後述のように両者は別の現象であって一致する必然性はない。

固有振動数 3.22Hz の場合は、実験風速の上限まで中振幅への発振が生じなかった。換言すれば、中振幅発振風速は 13m/s 以上である。一方、大振幅振動の停止風速は約 9.5m/s であり、両風速が一致していないことは明らかである。この中間の風速域では、合計 3 個の安定な応答が観測される。

間隔 2D の場合、振動発現後の振幅に対する風速の影響は小さく、風速によらずほぼ一定振幅をとるため、振幅の面から現象が風洞風速に支配されるのか、無次元風速に支配されるのかは考察できない。また、前述のように、中振幅への発振風速が捉えられていないので、発振風速からの考察も行えない。よって、間隔 2D の場合、振動停止風速だけが唯一の有意な情報となる。図 1、2 の比較から、大振幅の停止風速は明らかに風洞風速に支配されていると言える。中振幅の停止風速は、間隔 3D 以上の場合と同様、どちらとも断定はできないように思われる。

既往研究によれば、円柱間隔 3D でハード型の応答が観測された例があるのに対し¹⁾、本実験では間隔 2D でのみ発生した。本実験に使用した円柱径 32mm は、当該研究の円柱径 50mm よりも若干小さめであることから、レイノルズ数の影響である可能性も否定できない。因みに同報告によれば、円柱径 100mm では、間隔 4D でもハード型を観測している。一方、質量減衰パラメータによっても応答特性が変るとの指摘もあり、詳細は今後の課題である。

2.4 応答特性のまとめ

既往の研究と同様のウェーク・ギャロッピング現象を観測した。

並列円柱は、円柱間隔 2D の場合と 3D 以上の場合で顕著に異なった応答を示す。

間隔 2D の場合の大振幅振動は、無次元風速で整理できない可能性が高い。

その他の応答はほぼ無次元風速で整理可能ではないかと思われる。

3 定常圧力特性

3.1 実験の概要

自由振動実験の結果から、ウェーク・ギャロッピングの振動応答特性は円柱間隔によって顕著に変化することが明らかとなった。そこで、下流側円柱に作用する定常圧力が、2本の円柱間の距離と下流側円柱位置によってどのように変化するかを調べるため、下流側円柱の表面圧力分布を測定した。得られた結果は次項で述べる非定常圧力特性と比較し、準定常理論によるメカニズムの考察が可能かどうか検討する。実験のパラメータは円柱中心間隔(d)と下流側円柱の鉛直変位である。

3.2 実験方法

ケーブル模型および円柱の配置は自由振動実験と等しくした。円柱間隔(d)も2D、3D、4Dの3ケースである。下流側円柱の変位は、0mm～±30mm(2.5mmピッチ)、±35mm、±40mmとした。実験気流は一様流、風洞風速約10m/sである。基本的な実験条件を表2に示す。

下流側円柱のみ32点の圧力孔(=11.25°ピッチ)を設け、円柱水平間隔(d)を一定に保ちながら上下に変位させ、下流側円柱に作用する表面圧力を測定した。サンプリング周波数100Hz、サンプリング時間30秒を1ケースとして3ケースの測定を行い、風洞内前方に設けたピトー管動圧で無次元化して平均圧力係数を求めた。なお、円柱の配置図、下流側円柱の圧力孔および変位入力システムは、非定常圧力を測定した条件と同じため非定常圧力の項にまとめて記述する。

表2 定常圧力測定 実験条件

円柱径 D(mm)	32
円柱長(mm)	790
円柱間隔	2D 3D 4D
変位(mm)	0 ~ ±30(2.5ピッチ) ±35 ±40
圧力孔位置(度)	0 ~ 348.75(11.25ピッチ 32点)
実験風速(m/s)	10.7
レイノルズ数	2.3×10^4

3.3 定常圧力測定結果

3.3.1 測定圧力の対称性

ケーブル模型の円柱には、自由応答実験と同じく特別な加工をしていないため、円柱上部と下部の流れの剥離点が異なる可能性が考えられた。そこで、測定された圧力係数の、上下方向の対称性を照査した。結果の一例を図4に示す。図の縦軸は計測された平均圧力係数 C_p 、横軸は圧力孔位置(度)である。なお、図には下流側円柱が上向きに変位(正)したときの時計回り(上部)の圧力孔と、下向きに変位(負)したときの半時計回り(下部)の圧力孔が対応するものとしてプロットしてある。したがって、下部の圧力孔位置は反転されていることに注意されたい。ここに示した図以外の変位に対する同図は付図 1.1-3 (下流側円柱表面の圧力係数の対称性)に全て収めてある。

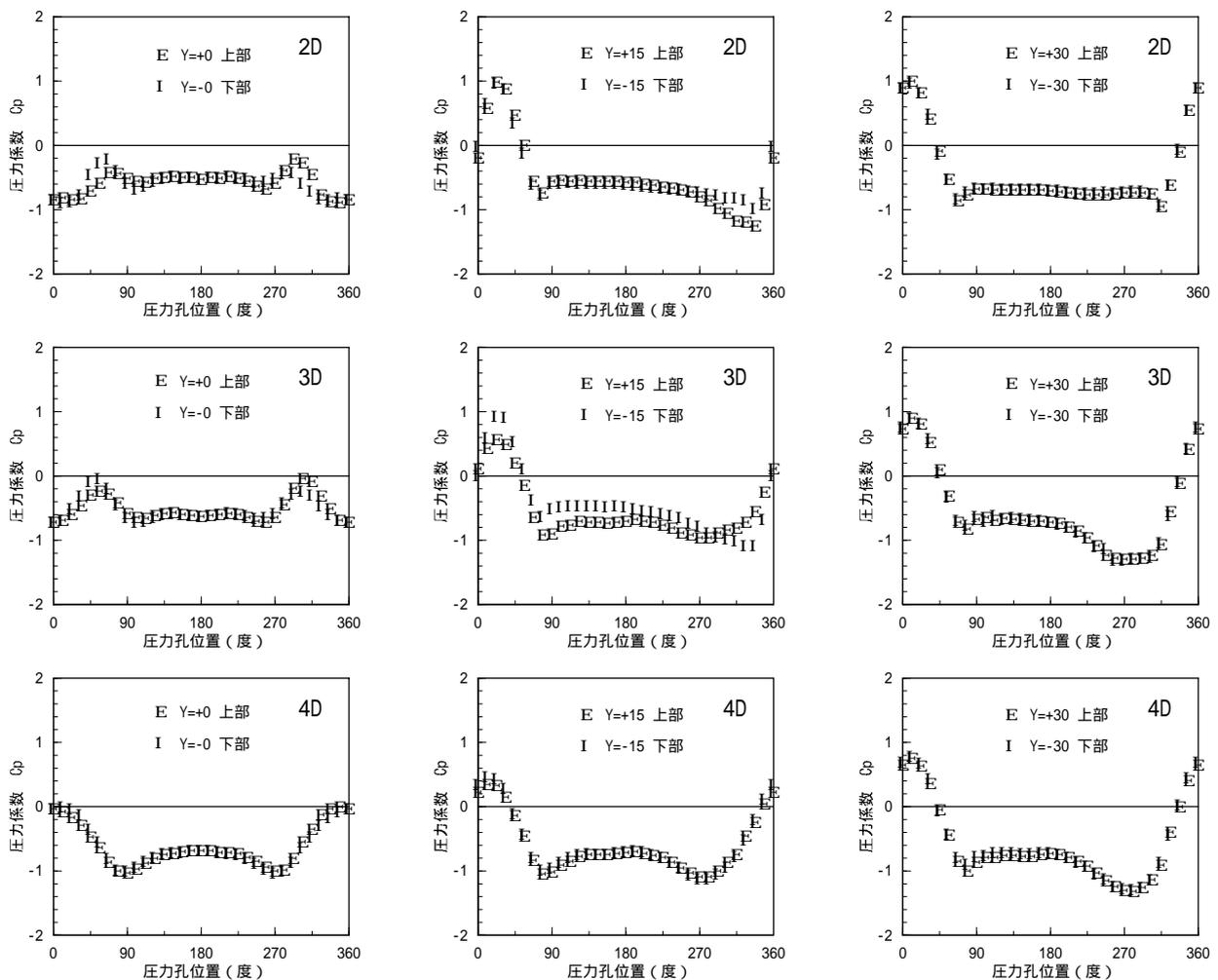


図4 圧力の対称性 風速 10.7m/s

間隔 2D、3D の変位 $\pm 15\text{mm}$ 以下では、上部と下部の圧力係数に差が認められるのに対し、間隔 2D、3D の変位 $\pm 17.5\text{mm}$ 以上および間隔 4D の場合の上下の圧力係数はよく一致している。換言すれば、円柱間隔が狭く変位が小さい場合、上下の圧力係数に差が生じている。付図 1.1-3 によれば、間隔 2D、3D で上下の圧力に顕著な差が生じるのは、円柱変位が $\pm 7.5\text{mm} \sim \pm 15\text{mm}$ の場合であった。なお、間隔 2D の変位 $\pm 7.5\text{mm} \sim \pm 15\text{mm}$ でも、上下の圧力係数が一致しているように見られる場合もあった。

間隔 2D、3D の変位 $\pm 15\text{mm}$ 以下の場合を除けば、本実験に使用した円柱の平均表面圧力は、ほぼ上下対称と言える。

圧力に非対称性が認められたケースでは、上流側円柱からの剥離点の移動によって平均流が非対称性になっているのか、あるいは後流渦などによる非定常性が持つ非対称性の影響が現れたのか、今回の実験では明らかでない。いずれにせよ、非対称性が認められたのは一部のケースに過ぎないこと、非対称性そのものもさほど大きくないことから、風洞気流自身の非対称性や模型セッティングの問題などの致命的欠陥はないものと判断した。

3.3.2 定常圧力の特性

静的に変位している場合の下流側円柱の圧力分布を付図 2.1-3 に示す。なお、前項で記したように下流側円柱の定常圧力はほぼ上下対称性であるため、下流側円柱が上向きに変位した場合のみ表示した。以下、代表的な変位における圧力分布と、圧力から推定される流れについて述べる。

円柱間隔 2D の場合

図 9.1 の右側に、円柱間隔 2D の場合の $Y/D = 0, 0.31, 0.63$ における圧力分布を示す。 $Y/D = 0$ の場合、下流側円柱の圧力は全域で負の値を示す。この負圧は、下流側円柱全体が上流側円柱の後流内に入っているために生じたものと考えられる。特に $\pm 45^\circ$ の範囲の圧力が低く、物体に近づくほど後流内の圧力が低下するという一般的な知見と整合している。下流側円柱の変位が微小な場合、圧力分布に顕著な変化は見られず、後流域内の圧力の特徴を維持している。従って、この場合、図 5.1 の左上段のように、上流側円柱からの剥離剪断層が下流側円柱を包み込むような流れとなっているものと考えられよう。

$Y/D = 0.31$ 程度まで変位が増加すると(図 5.1 中断)、 45° 付近の圧力が増加し、 $C_p = 1.0$ 程度となる。また、この時、 $\theta = 315^\circ$ 付近の圧力は急激に低下し、 C_p は -2.0 弱となっている。 $C_p = 1.0$ という正圧は、通常よどみ点で生じる。従って、図 5.1 の中断左に示したように、剥離剪断層内のほぼ一般流に等しい速度を持つ流れが下流側円柱の 45° 付近に当たっていると推定することは、さほど無理がないであろう。この点がよどみ点であるとすれば、この点に当たった流れは上下に分かれて流れることになる。すなわち、図に示した通り、上流側円柱の上側の剥離剪断層の一部は下流側円柱の下側に流れ込むような流れが形成されることになり、いわゆるギャップフローが生じていることになる。下流側円柱の変位がさほど大きくないため、このギャップフローは相対的に狭い間隙を通過することになり、流速が増加すると考えれば、ベルヌーイの定理から 315° 付近の圧力低下を合理的に説明できるように思われる。

更に変位が増加し、 $Y/D = 0.63$ 程度になると、 315° 付近の圧力は -1 程度まで回復する。また、圧力が最大となる点は $\theta = 20^\circ$ 程度であり、上流端($\theta = 0^\circ$)に近づく。この時の流れは、図示したようにギャップフロー的な流れから、単独円柱周りの流れに近付いているものと考えられよう。

円柱間隔 3D、4D の場合

円柱間隔 3D、4D の場合の圧力分布(図 5.2、5.3)も、定性的には 2D の場合と大きくは変わらない。従って、図示したように円柱周りの流れも、既述の 2D の場合と同様であると理解してよいように思われる。

$Y/D = 0$ の場合の上流側($\theta = 0^\circ$)の圧力は円柱間隔の増加とともに上昇しているが、上流側円柱の後流内での圧力分布を考えれば当然の結果と言えよう。中段の図における 315° 付近の負圧も円柱間隔増加とともに上昇しているが、ギャップが増加していることから速度上昇も少ないためと考えれば容易に説明可能であろう。

3D と 4D の比較から興味深いのは、間隔 3D の場合、よどみ点圧力は $Y/D = 0.55$ の場合と 0.78 の場合でほとんど変わらないが、むしろ 0.78 の場合の方が若干小さい程度であるのに対して、間隔 4D では、明らかに変位の増加とともによどみ点圧力が増加している点である。間隔 3D では上流側円柱からの剥離による加速された流れがよどみ点に当たっているのに対して、間隔 4D では剥離剪断層のミキシングが進み、むしろ減速した流れがよどみ点に当たっているためではないかと想像される。そうであれば、間隔 4D の場合は流れをギャップフローによる収束現象として握えるよりも、単に上流側に障害物のある流れとして握えるほうが適切とも思われる。

風向

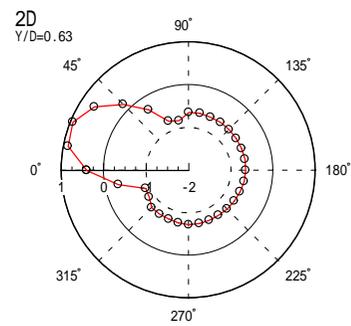
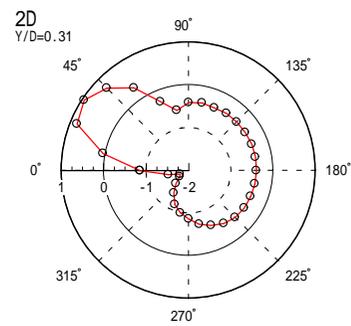
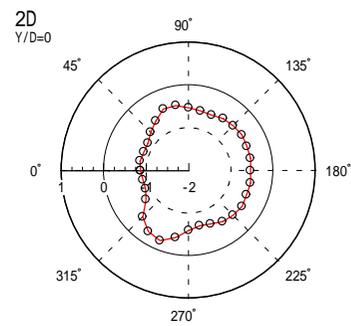
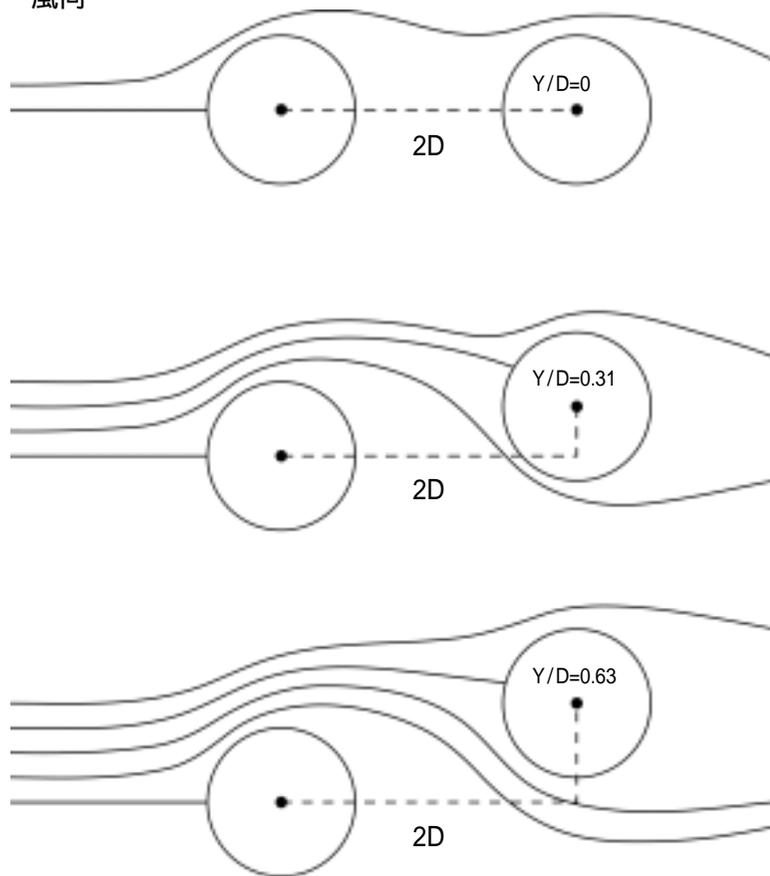


図 5.1 円柱間隔 $2D$ の並列円柱周りの流れと表面圧力係数

風向

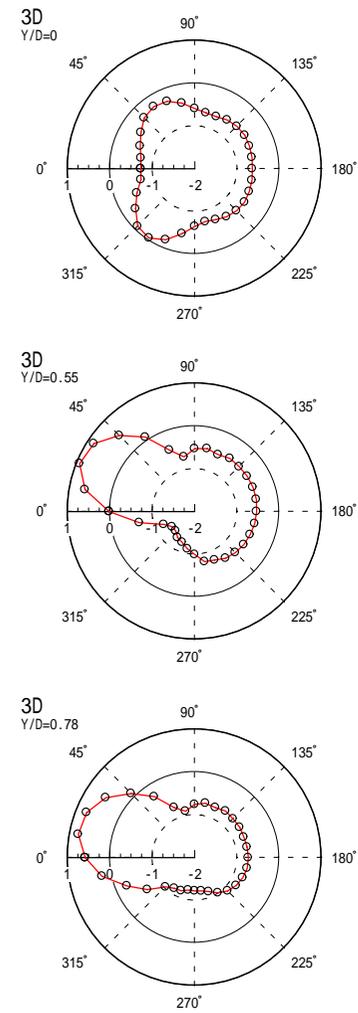
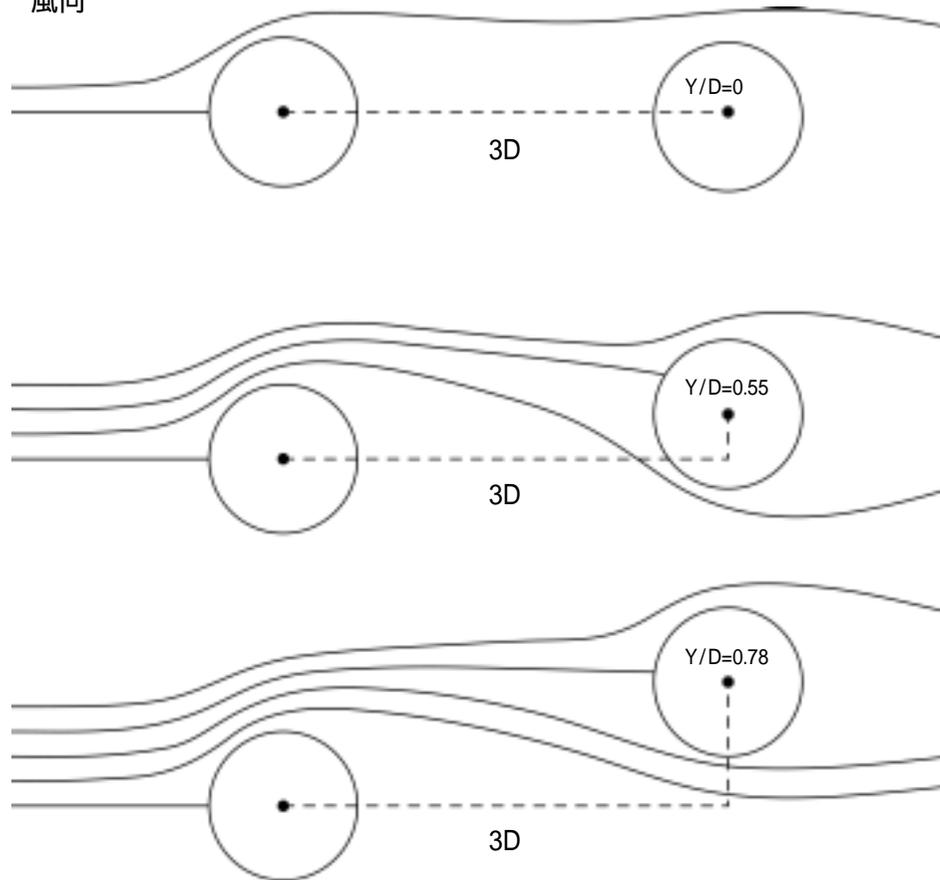


図 5.2 円柱間隔 $3D$ の並列円柱周りの流れと表面圧力係数

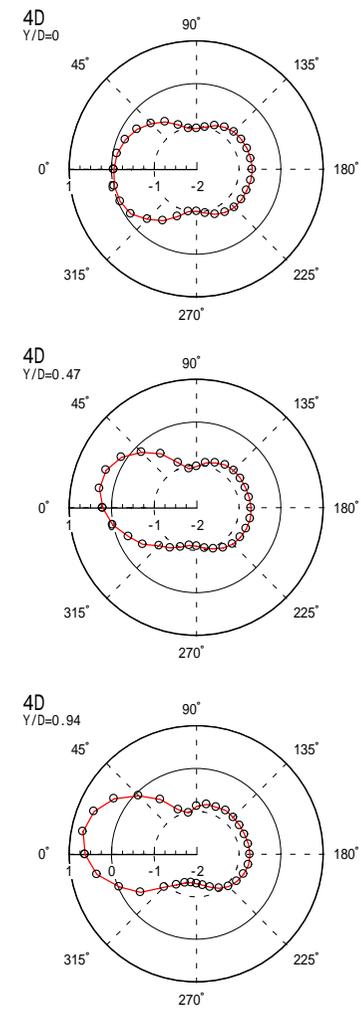
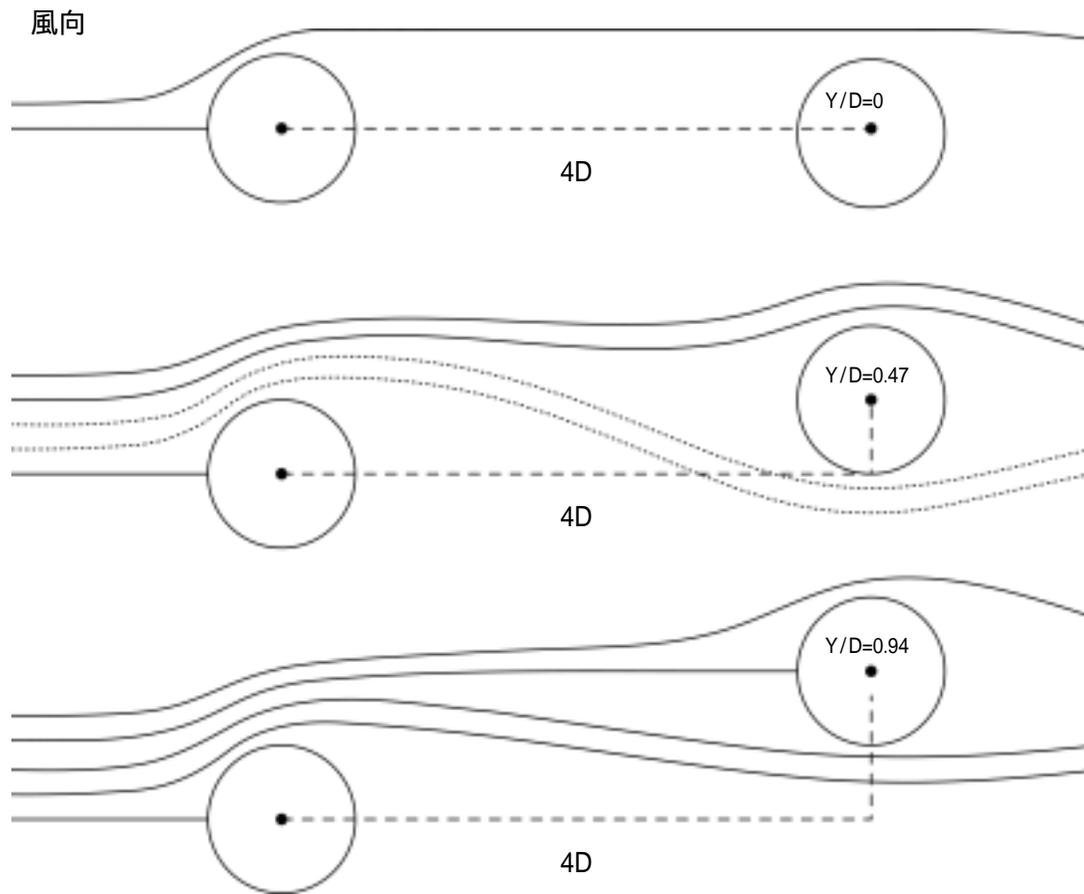


図 5.3 円柱間隔 4D の並列円柱周りの流れと表面圧力係数

3.3.3 定常揚力

前項に述べた定常圧力から揚力を求めた。結果を図 6 に示す。図の縦軸は、円柱径で無次元化した無次元変位 Y/D 、横軸は、測定された各圧力孔に対する平均定常圧力に風向直角方向の方向余弦を乗じて周積分した、定常揚力 (N) である。なお、無次元変位は下流側円柱が上流側円柱より上にあるときを正、揚力は上向きを正とした。(基本式は、記号と用語の項目を参照されたい。)

先の項で述べたように、円柱の上下部が対称であることから、測定された揚力はいずれの図も原点对称である。よって、下流側円柱が上向き (正) に変位した状態の下流側円柱に作用する定常揚力を考察する。図からも明らかなように、円柱間隔によらず下流側円柱が上に変位した場合の揚力は常に下向きである。従って、揚力の作用は復元力的であるといえる。

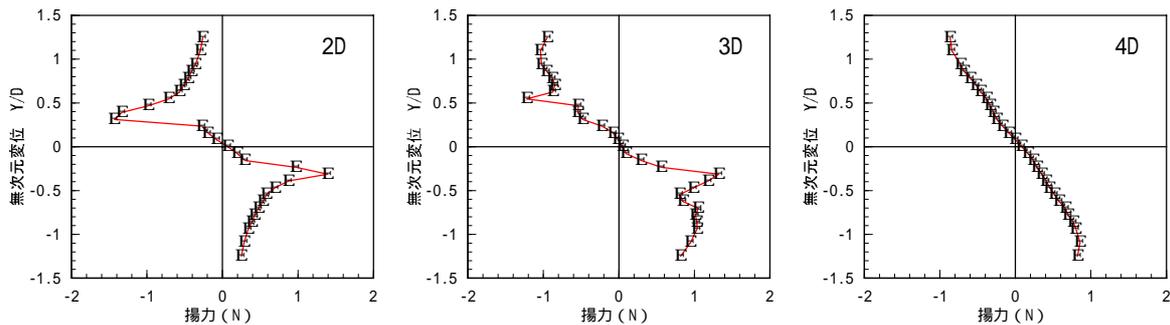


図 6 揚力と変位の関係 風速 10.7m/s

間隔 2D では変位 (Y/D) = 0.3 に、間隔 3D では変位 (Y/D) = 約 0.5 に揚力のピークが認められるのに対し、間隔 4D では、顕著なピークは見られない。間隔 2D の場合、ピークを過ぎると変位の増加にともなって揚力の絶対量は減少する。一方、間隔 3D、4D では、間隔 3D の揚力のピーク付近で若干減少するが、全体としては、単調に増加していると言える。なお、間隔 3D には、揚力が特徴的に変化する点が 2 点あるようにも見られる。ただし、 Y/D が十分に大きい時の揚力は 0 であるから、間隔 3D、4D の場合も、ある変位 Y/D で揚力の絶対量が最大となった後、減少することは自明である。間隔 3D の $Y/D = 1$ 付近で揚力が極大になっているようにも見えるのは、この現象を握えている可能性がある。4D では、そのような傾向は顕著には認められない。おそらく、揚力の最大値は実験範囲を越えた大きな変位で生じるものと考えられる。

間隔 2D における揚力のピークは前述したギャップフローと関係があると考えるのが自然である。付図 3.1 に示した Y/D と各圧力孔の圧力変化の関係から、そのメカニズムを考える。付図 3.1 の $\theta = 45^\circ$ 付近の圧力を見ると、 $Y/D = 0.3$ では正の、 $Y/D = -0.3$ では負のピークが生じている。言うまでもなく前者はよどみ点における正圧、後者はギャップフローの高速流による負圧である。この 2 つのピークは、ともに下向きの力となる。すなわち、2D における揚力のピークは、この 2 つの流れの効果を加算された結果、生じたものと考えられる。一方、間隔の大きい 4D の場合の圧力には、このようなピーク状の変化は認められない。

$\theta = 0^\circ \sim 45^\circ$ 付近の圧力はく字状の変化を示しているが、この領域の圧力の場合への寄与は小さいから、揚力変化の本質に大きく係わっているとは思われない。揚力の寄与が大きい 90° 付近の圧力は、 Y/D の増加に伴って単調に増加している。4D の場合のギャップフローは直線的な流れに近くなるから、 $Y > 0$ の場合、ギャップフローよりも、下流側円柱の上側を通る外縁流の方が、流線が長く、流速が高くなるように思われる。その場合、 $\theta = 90^\circ$ 付近の圧力は Y の増加とともに低下するはずであり、4D の場合の圧力変化は、全く異なったメカニズムに支配されていると考えるべきであろう。4D の場合、 $\theta = 0^\circ$ での圧力変化は、2D、3D と異なり、 $Y/D = 0$ で最小値をとる滑らかな曲線となっている。すなわち、上流側円柱の後流内の分布圧力は、上流側円柱に近い領域では、ある範囲内では一様に近い分布であるのに対して、

上流側円柱から充分離れた場所では後流内へのエネルギー移送の結果、中心で最小となる滑らかな分布となることを示している。下流側円柱の揚力変化は、このような上流側円柱の後流域内の圧力分布を反映していると考えるのが妥当であろう。その意味では、前述したように、上下流円柱の相互作用というよりは、障害物としての上流側円柱が作り出す圧力場が支配する現象と言ってもいいように思われる。2Dの場合、揚力のピークを過ぎると揚力の絶対値が急激に減少する現象も同じ理由であろう。図 2.2 の $\theta = 0^\circ$ の圧力変化によれば、2D の場合、上流側円柱に極めて近いので、 $Y/D = \pm 0.3$ の範囲では $C_p = -1.0$ でほぼ一定であり、この領域の外では急激に圧力が回復している。すなわち、ギャップフローとよどみ点による圧力ピークが生じる位置と後流を外れる位置が極めて近いため、ピークを生じた後、急激に揚力の絶対値が減少するのではなからうか。3Dの場合は、2Dと4Dの中間的な特性と考えられる。すなわち、ギャップフローとよどみ点によるピークを過ぎても後流内の圧力勾配による揚力絶対値の増加が続き、 $Y/D = 1.0$ 付近で圧力勾配の減少による揚力低下が生じていると考えられる。

以上より、定常揚力から得られた結果をまとめる。

間隔 2D では、ギャップフローの高速流による圧力低下と、よどみ点の圧力上昇によって、特定の位置で負揚力のピークが生じる。

間隔 4D の場合は、上流側円柱の後流域内の圧力勾配に支配されていると考えられる。

間隔 3D では両メカニズムによる揚力が観測される。間隔 2D では揚力ピークの位置と圧力勾配による揚力が減少する位置が極めて低いため、ピークの後、急激に揚力が減少するように見えるのではないかと推定される。

3.3.4 準定常揚力

定常圧力測定から得られた変位と揚力の関係から、準定常揚力を求めた。結果を図 7 に示す。なお、演算に使用した変位の調和関数は、周波数 2Hz、振幅 40mm(定常圧力測定 of 最大変位)の SINE 波である。図の破線は無次元変位、実線は揚力である。

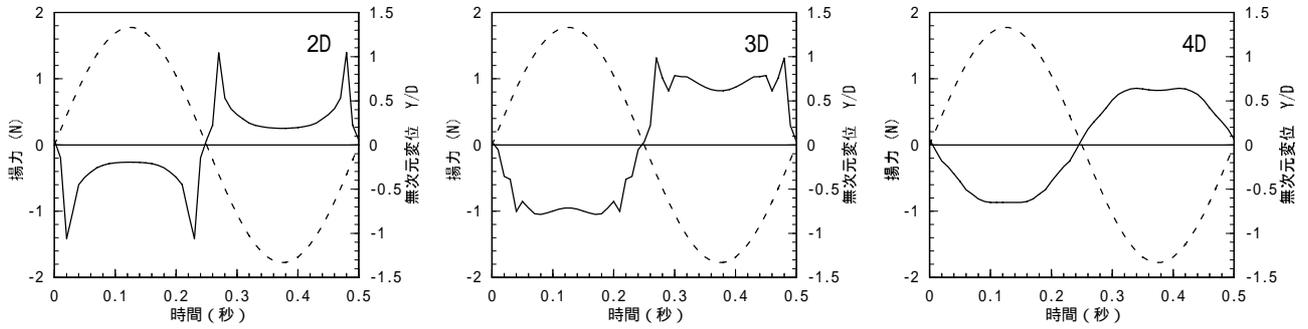


図 7 準定常揚力と変位の関係

この準定常揚力を用いた応答予測の可能性については後述する。

3.4 定常圧力特性のまとめ

下流側円柱の変位がある大きさに達すると外縁流が両円柱の間を流れるギャップフローにスイッチする。

この時、よどみ点の正圧と、高速ギャップフローによる負圧によって、負揚力のピークが生じる。ピークは間隔 $2D$ で最も顕著である。 $3D$ でもピークは発生するが、 $4D$ では発生しない。

上流側円柱の後流が作り出す圧力場も下流側円柱の揚力の原因となる。間隔 $4D$ での揚力には、この圧力勾配が支配的である。

間隔 $3D$ では両メカニズムによる揚力が同時に観測される。

4 非定常圧力特性

4.1 実験の概要

ウェーク・ギャロッピングは振動現象であるから、そのメカニズムを把握するには非定常空気力の測定が有効である。本学風洞には非定常空気力測定装置が設置されていないこと、および流れを理解するには圧力が有効な情報となることから、ここでは非定常圧力分布を測定し、これを積分して非定常揚力を求めることとした。非定常圧力の測定例は散見されるが、¹⁾円柱表面全域に渡って詳しく調べた研究例は少ない。実験パラメータは、円柱間隔(d)、風速(V , V_r)、加振振幅(Y)とした。

4.2 実験方法

ケーブル模型の円柱および配置は自由振動実験と等しくした。円柱間隔(d)も $2D$ 、 $3D$ 、 $4D$ の 3 ケースである。実験気流は一樣流、風速(V)は 3m/s 、 $4\text{m/s} \sim 12\text{m/s}$ (2m/s ピッチ)とした。加振振幅(Y)は $0\text{mm} \sim 30\text{mm}$ (2.5mm ピッチ)とし、自由振動実験で記述した円柱間隔 $2D$ の大振幅が存在する風速 10m/s 以上(大振幅)では、加振振幅(Y) 35mm と 40mm の追加実験をおこなった。加振周波数は、自由振動実験の固有振動数と同じとすべきであるが、時間の制約から自由振動実験の固有振動数の小さいケースと近い値 (2.51Hz) の 2Hz のみとした。 2Hz で強制振動させた場合、測定結果は無次元風速によって整理すれば自由振動実験との比較が可能となる。また、間隔 $2D$ の大振幅では、現象が前述のように実風速に支配されているとすれば、振動数によらず同一の結果が得られるはずであるので、特に問題はないと考えた。基本的な実験条件を表 3 に示す。

下流側円柱のみ 32 点の圧力孔 ($\approx 11.25^\circ$ ピッチ)を設け、円柱間隔(d)を一定に保ちながら上下に強制振動中の、下流側円柱に作用する表面圧力を測定した。サンプリング周波数 100Hz 、サンプリング時間 30 秒を 1 ケースとして 3 ケース測定し、ピトー管動圧で無次元化して圧力係数を求めた。下流側円柱の変位は、ロードセルによって検出し、圧力係数と同時に測定した。変位の測定では、若干の高周波ノイズが見られたため、カットオフ周波数を 300Hz として、ローパスフィルターを用いた。なお、圧力係数の測定にはフィルターを使用していない。

下流側円柱の変位は、サーボ型モータによって与えた。図 8 に、円柱の配置図、下流側円柱の圧力孔および加振システムの略図を示す。

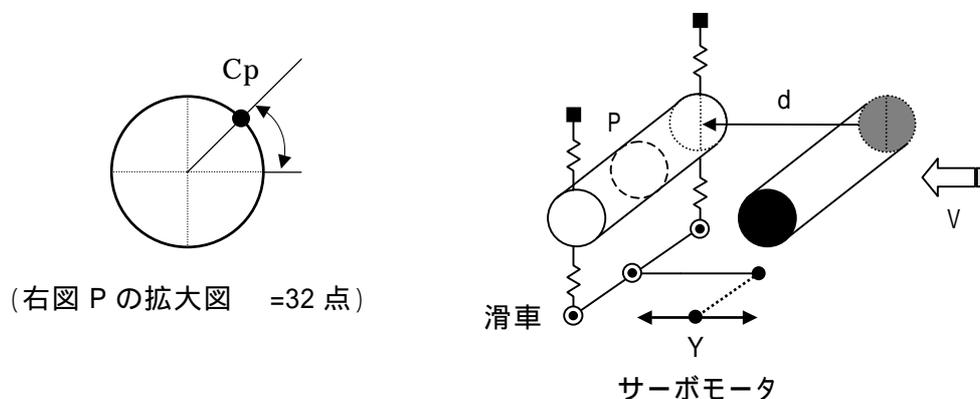


図 8 非定常圧力測定 配置図

表 3 非定常圧力測定 実験条件

円柱径 D (mm)	32
円柱長 (mm)	790
円柱間隔	2D 3D 4D
加振周波数 (Hz)	2
加振振幅 (mm)	0 ~ ±30 (2.5 ピッチ) ±35、±40 (間隔 2D の風速 10m/s 以上)
圧力孔迎角	0 ~ 348.75 (11.25 ピッチ 32 点)
実験風速 (m/s)	3、4 ~ 12 (ピッチ)
レイノルズ数	~ 2.6 × 10 ⁴

4.3 非定常圧力測定結果

4.3.1 非定常揚力と自由応答特性との整合性

非定常空気力は振動中の物体に作用する空気力の調和成分であるから、振動メカニズムとして振動速度(変位)に比例した空気力による自励振動を念頭においたものと言える。そこで、非定常圧力測定によって得られた圧力係数から空力粘性抵抗係数(C_i)を求め、自由応答特性との整合性を検討した。記号と用語の項に示したように、非定常揚力は速度比例成分項と変位比例成分項の和の形で表現できる。この速度比例成分項の係数(C_i)が空力減衰として構造系に作用する。そこで、測定圧力係数から非定常揚力を求め(測定圧力係数に方向余弦を乗じ集積分をする)、調和関数の直交性を利用して速度比例成分項の係数(C_i)を求めた。具体的には、非定常揚力を加振周波数の波長の整数倍に区切り、変位データとの積、すなわち内積から C_i を算出した。最後に、構造粘性抵抗係数(C)と空力粘性抵抗係数(C_i)の差をである粘性抵抗係数($C-C_i$)を求めた。計算に使用した構造粘性抵抗係数(C)は、自由振動実験時の2ケースの平均値である。粘性抵抗係数($C-C_i$)が負の場合は発散振動を、正の場合は減衰振動を意味している。

円柱間隔 2D の場合

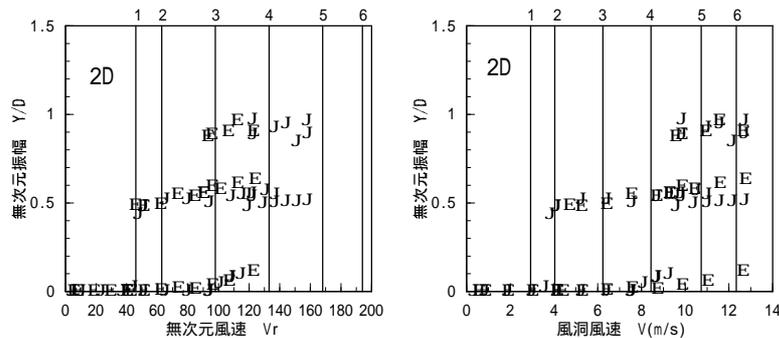


図 9.1 無次元風速 (V_r) および風速 (V) と自由振動応答

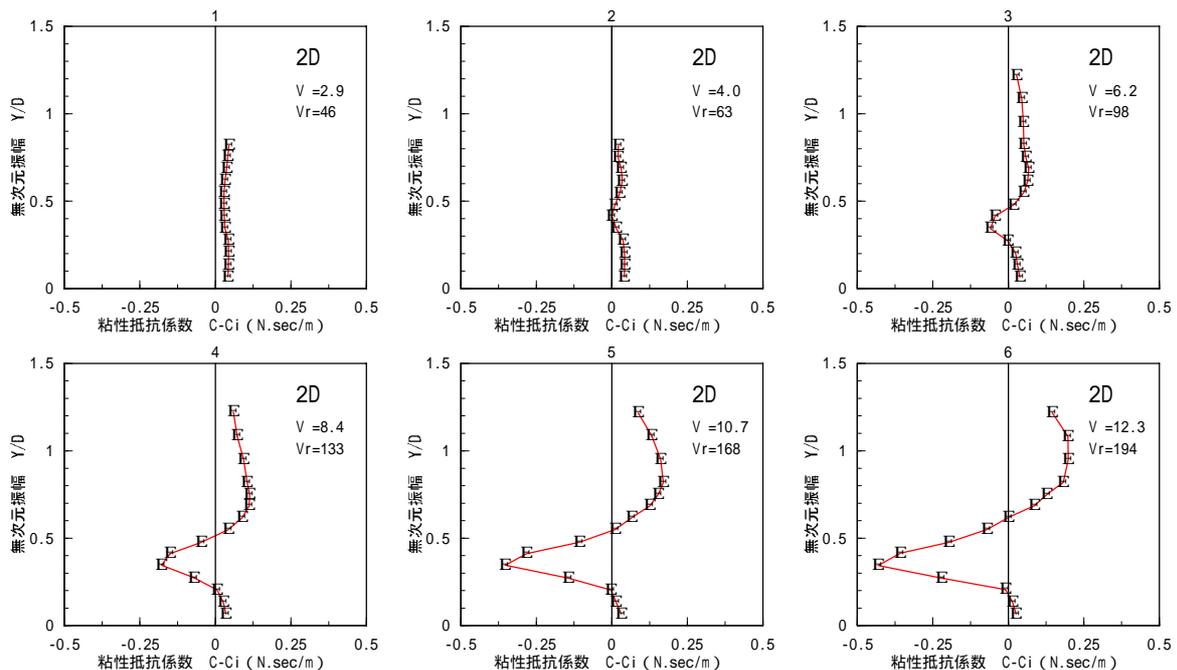


図 9.2 粘性抵抗係数 ($C-C_i$) と無次元振幅

図 9.1 に自由振動応答を再掲する。図中の縦線は、非定常圧力測定を行った風速を示す。図 9.2 は、空力減衰と構造減衰の差 ($C-C_i$) と無次元振幅 (Y/D) との関係を示したものである。図の縦軸は加振振幅を円柱径で除した無次元振幅 (Y/D)、横軸は粘性抵抗係数 ($C-C_i$) である。また、図 9.2 の各図上の番号は、図 9.1 の縦線、すなわち実験風速の番号である。

図 9.2 によれば、風速 4m/s 以上の場合、粘性抵抗係数 ($C-C_i$) は、微小振幅では正であるが、無次元振幅 0.2 程度から負となり、無次元振幅 0.3 程度で急激に減少し大きな負のピーク値を示す。その後、無次元振幅 0.5 程度で正となり、無次元振幅 1 程度まで緩やかな曲線を描きながら増加する。従って、自由振動の章で指摘した通り、円柱間隔 2D にあける非定常空気力は、強い振幅非線型を有するものと言える。無次元振幅 1 を越えると、減少傾向にあるようにも見られるが、負の値は認められない。粘性抵抗係数 ($C-C_i$) の負値 (負減衰) は発散振動を意味するから、負から正の値 (正減衰) に変る点が自由振動応答の安定な振幅である。よって、図 9.2 から、無次元振幅 0.5 付近が安定な振幅となる。安定な振幅は風速の増加とともに若干増加傾向にあるようにも見られるが、風速による変化はさほど大きくない。自由振動実験では安定な応答振幅が 3 点認められたが、図 9.2 では、安定な振幅に相当する点は 1 点しか認められない。なお、負のピーク値も風速によらず、ほぼ無次元振幅 0.3 で生じている。

円柱間隔 2D の場合、粘性抵抗係数から求められた安定な無次元振幅 0.5 程度 (図 9.2) は、自由振動応答から得られた中振幅とよく一致している。従って、中振幅の応答は自励振動理論から振動現象を定量的に評価することが可能であると言える。

小振幅に対応する振幅では、負減衰は認められない。従って、自由振動応答で測定された小振幅はパフェッティング的な振動ではないかと想像されるが、強制外力としての揚力は測定していないので、詳細は不明である。

次に、自由振動応答において観測された大振幅の応答について述べる。大振幅の振動現象が、通常の自励振動理論によって説明可能であれば、非定常圧力測定結果において負減衰から正減衰への変化が観測されるはずであるが、本実験では、そのような現象は認められなかった。しかしながら、一方で、物体変位と独立な外力による強制加振的な特徴は認められず、自由振動応答を観測する限り、この振動は自励的な特徴を強く持つものと認められる。従って、一般的な空力負減衰に起因する自励振動ではなく、全く別の形の、たとえば非線型自励振動のようなメカニズムを考える必要があるようにも思われる。これについては、若干の試行結果を後述する。

円柱間隔 3D の場合

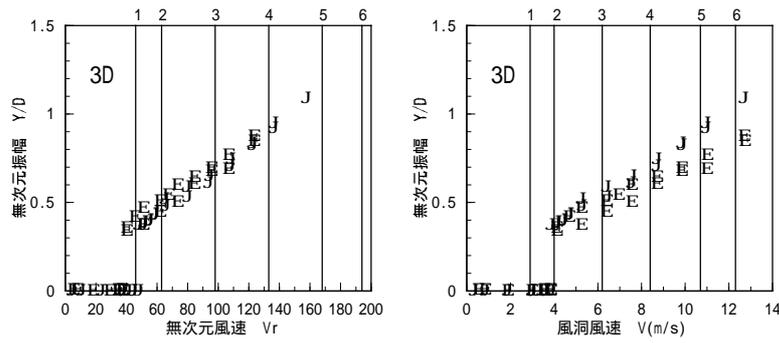


図 10.1 無次元風速 (V_r) および風速 (V) と自由振動応答

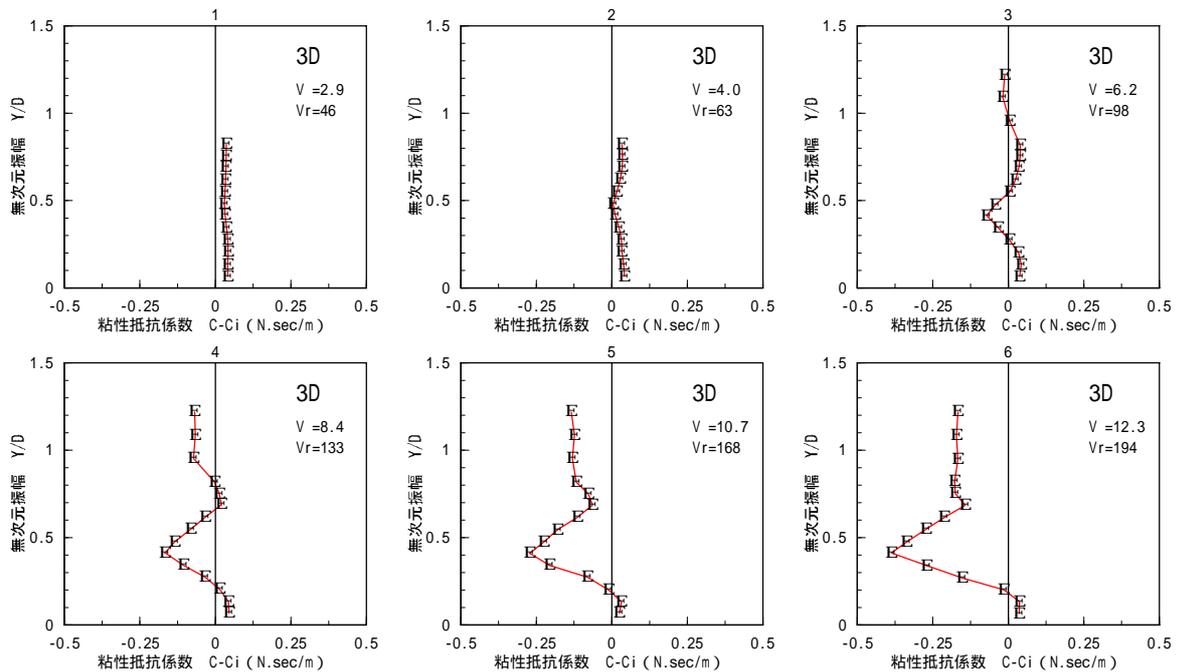


図 10.2 粘性抵抗係数 ($C-C_i$) と無次元振幅

図 10.1 と図 10.2 に、円柱間隔 2D の場合と同様の、自由振動応答および空力減衰と構造減衰の差 ($C-C_i$) と無次元振幅 (Y/D) の関係を示す。

図 10.2 の粘性抵抗係数 ($C-C_i$) において、安定な振動が明確に認められたのは、風速 6.2m/s と 8.4m/s の 2 ケースだけである。風速 4.0m/s の場合も、極めて 0 に近い値を取っているので振動発生の可能性はあり得る。一方、高風速の 10.7m/s および 12.3m/s の場合の粘性抵抗係数は、無次元振幅約 0.4 で負のピークとなった後、増加する傾向は認められるが、正には至っておらず、振動が発散し続ける状況を示している。

粘性抵抗係数の測定結果から得られる振幅は、 $V = 4.0\text{m/s}$ ($V_r = 63$) で $Y/D = 0.45$ 、 $V = 6.2\text{m/s}$ ($V_r = 98$) で $Y/D = 5.5$ 、 $V = 8.4\text{m/s}$ ($V_r = 133$) で $Y/D = 6.5$ である。図 10.1 の左図 (Y/D と V_r) と比較すれば、風速の増加とともに振幅が増加するという定性的な傾向は一致しているが、定量的には自由振動実験結果より、約 2 割程度低風の値を示していると言える。この理由は必ずしも明らかではないが、減衰対粘性抵抗係数の勾配が緩やかなため、振動評価に誤差が生じやすいことが影響しているのではないかと考えられる。事実、極めて狭い振幅範囲でのみ粘性抵抗が 0 に近づく $V_r = 63$ の場合の振幅は自由振動実験の結果と比較的良好一致を示している。 $V = 10.7\text{m/s}$ 以上の風速での結果は、自由振動では対応する

実験値がないため評価できないが、仮に図 10.2 の結果が事実であるとすれば $Vr = 160$ の高風速では Y/D が 1.3 を越えるような大振幅に発達することを意味しているので、工学的には注意が必要と言えよう。

$V = 6.2\text{m/s}$ の粘性抵抗係数には、正の値には至っていないものの、 $Y/D = 1.3$ 程度に安定な振幅が発達する可能性を示唆するような傾向が認められる。一方、 $Y/D = 0.7$ 以下での粘性抵抗係数の無次元振幅に対する変化は、風速によらずほぼ同一の振幅での負のピークが発生するなど、間隔 $2D$ の場合と似たような傾向が見られないこともない。以上を総合すれば、 $3D$ の場合の高風速では、 $2D$ の場合の中振幅に相当する現象は粘性抵抗係数の変化という意味では生じているが、負値を伴っているため現象としては発現せず、更に大きな振幅で、 $2D$ の場合の大振幅に似た現象が発生する可能性があるようにも思われる。

円柱間隔 4D の場合

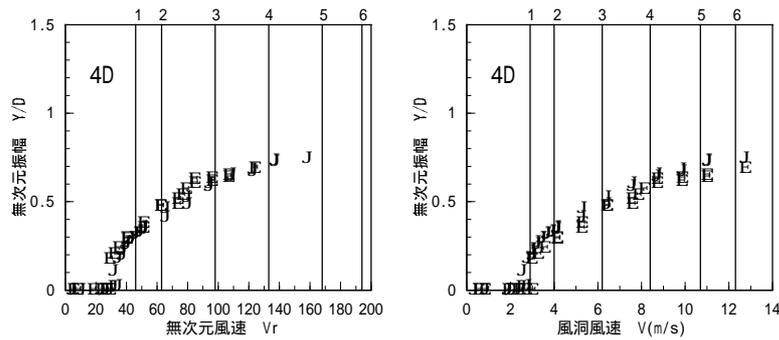


図 16.1 無次元風速 (V_r) および風速 (V) と自由振動応答

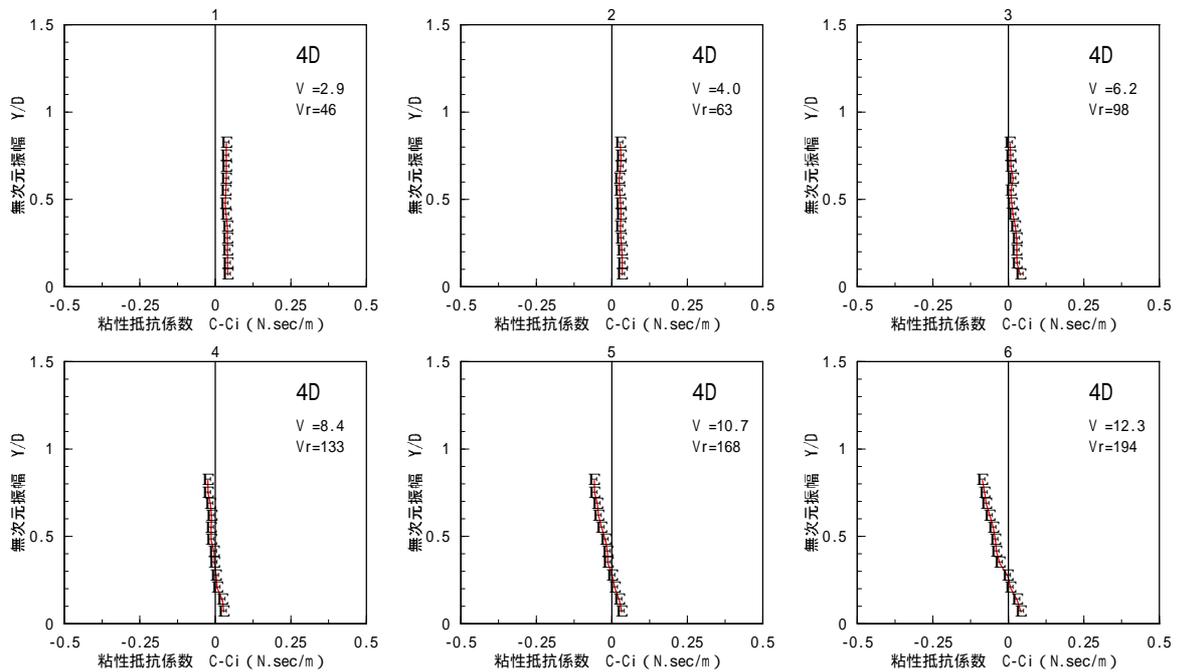


図 11.2 粘性抵抗係数 ($C-C_i$) と無次元振幅

図 11.1 と図 11.2 に、円柱間隔 4D の場合の結果を示す。

図から一見して明らかなように、粘性抵抗係数 ($C-C_i$) は、風速によらず、極めて小さな値となっている。風速 (V) 8.4m/s 以上の無次元振幅 0.3 付近から負の値が認められるが、円柱間隔 2D と 3D の場合に比べると値は非常に小さい。

風速 (V) 8.4m/s 以上では、測定範囲内では負減衰であるから、理論的には、振幅は極めて大きな値まで発散することになる。この結果は、図 11.1 から明らかなように、自由振動実験の結果と整合しない。定常圧力特性の項で記したように、間隔 4D における揚力は、上流側円柱の後流内の圧力勾配の寄与が大きい可能性が高い。従って、ギャップフローへのスイッチングの寄与の大きい 2D、3D の場合とは異なった励振メカニズムに従うことも考えられる。しかしながら、前述のように圧力係数が小さいため、図 11.2 の信頼性が相対的に低いことを考え、本研究では詳細な考察は行わないことにした。

4.3.2 非定常圧力と安定性について

準定常揚力と非定常揚力

準定常理論適用の可能性を探るため、定常圧力測定から求めた準定常揚力と、非定常圧力測定から得られた非定常揚力を検討する。図 12 の上段は定常圧力特性項で示した準定常揚力、下段は定常圧力測定時と同風速 ($V = 10.7\text{m/s}$) における非定常揚力である。なお、加振振幅は、円柱間隔 $2D$ と $3D$ では $Y/D = 1.22$ 、 $4D$ では $Y/D = 0.82$ である。非定常圧力測定によって得た全実験における非定常揚力の結果は、付図 4.1~4.3(非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均)に載せてある。

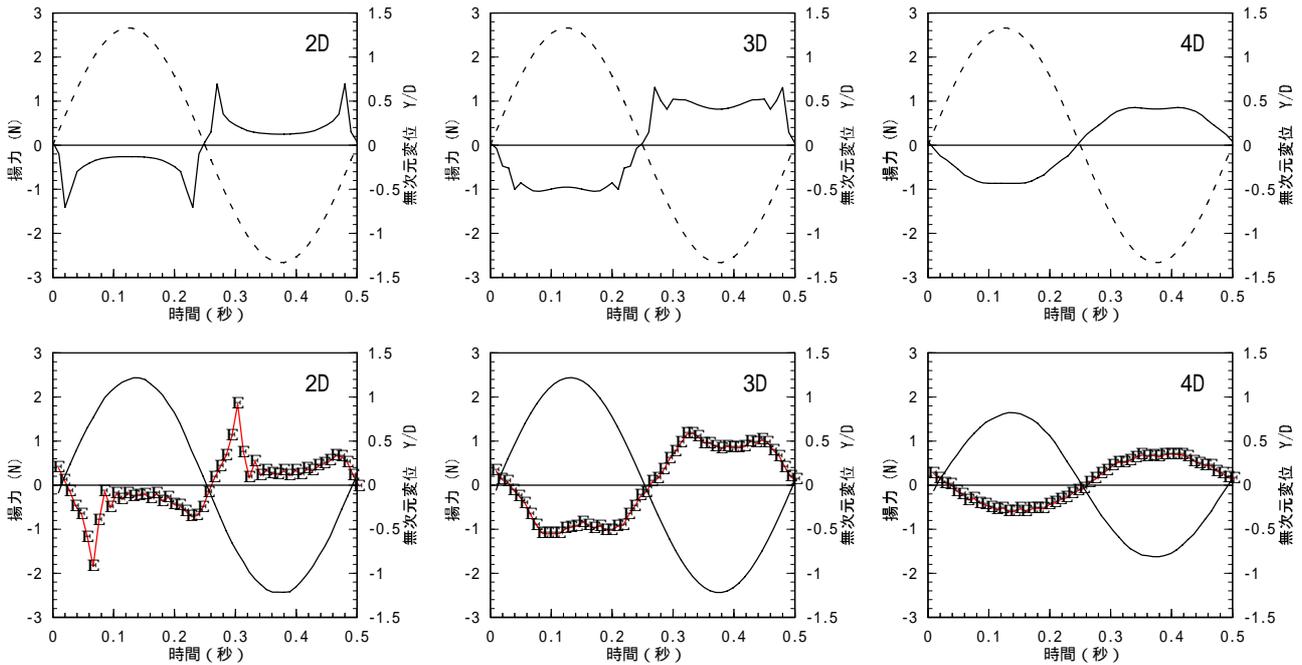


図 12 準定常揚力と非定常揚力の比較

準定常揚力は下流側円柱の変位のみ依存するから、運動方向や速度に関係なく同じ位置では同じ揚力となる。従って、ギャップフローへのスイッチングによって発生する揚力ピークは振動半周期に 2 回発生する。しかしながら、流れの履歴の影響を受ける非定常揚力は、一般に準定常揚力とは一致しない。従って、準定常理論適用の可否は、両空気力の差が励振メカニズムに関して本質的であるか否かによることになる。

間隔 $2D$ の場合について見れば、円柱が中立位置から上昇、あるいは下降する場合には非定常揚力にも準定常揚力と同様なピークが認められる。しかしながら、最大変位から中立軸に戻る途中で同じ位置に達した場合には、僅かにピークらしい形状は示すものの、準定常空気力のような明瞭なピークは生じない。以下、便宜上、中立位置から上昇(あるいは下降)している場合を上昇時、逆に中立位置に戻る場合を下降時と呼ぶことにすれば、上昇時にはギャップフローへのスイッチングによる揚力ピークが明瞭に生じるのに対して、下降時には、このピークはほとんど現れないと言える。このピークが変位と揚力の位相差を支配するのは明らかである。また、前項に述べたように、間隔 $2D$ における中振幅の応答は空力減衰、換言すれば、変位と揚力の位相差に起因するから、この両揚力の差は振動メカニズムの本質に係わるものであり、準定常理論は適用できないと考えるべきであろう。

一方、ギャップフローへのスイッチングが揚力に及ぼす影響が小さい間隔 $4D$ の場合、両揚力は、ほとんど一致しているように見える。また、前述したように、測定結果の信頼性に疑問は残るものの、 $4D$ にお

ける振動は、空力負減衰とは異なったメカニズムに支配されているように見えることをも考えれば、4D の場合には、準定常的な考えの方が問題解明への糸口になる可能性を否定できないようにも思われる。

加振振幅と非定常揚力

・間隔 2D の場合

間隔 2D の中振幅の応答は空力負減衰に起因する典型的な自励振動であり、その振幅は揚力の振動非線形性によって定まることは既に述べた。ここでは、間隔 2D の中振幅の応答を例に、加振振幅変化に伴う揚力変化について考察する。図 13 は間隔 2D、風速 10.7m/s の場合の振動 1 周期における揚力変化の例を示したものである。その他の風速、円柱間隔の場合の揚力は付録に収めてある。2D の中振幅応答の振幅は $Y/D = 0.5$ であるから、これより小さい振幅、および大きい振幅での揚力の変化が興味の対象となる。小さい振幅の例として $Y/D = 0.27$ について見ると、中立位置から円柱が上昇するに伴い、負の揚力が発生する。円柱位置の増加とともに揚力も減少するが、円柱変位が最大となっても揚力の減少は続き、円柱が中立位置に戻り始めた後、揚力が負のピークに達する。後半の半周期も同様である。また、細かく見れば円柱変位が 0 の時の揚力は 0 になっていない。定常圧力測定結果から、この振幅の場合、下流側円柱は上流側円柱の後流中にあり、流れのスイッチングは生じていないと推定される。従って、揚力は後流内の圧力分布に支配されていると考えられる。一方、前述のように、この間隔では中心付近の圧力は一様分布に近いから圧力の変化は大きくないはずであり、揚力変化は上昇した円柱の上側、すなわち後流の縁に近い部分の圧力上昇のためと考えられよう。図からも明らかのように、揚力変化は変位に対して遅れており、これが負減衰の原因であることは周知の通りである。この遅れの様子は付図 5 に収めた振動中のある位相角における圧力分布に明瞭に現れている。たとえば、付図 5.1.1.1 の $Y/D = 0.10$ の場合の分布は、ほぼ上下対象であるが、これは定常圧力で言えば $Y/D = 0.0$ の場合に相当する。これは、一般に流れの遅れと呼ばれる現象で、流れの状態は、その瞬間の物体の位置(境界条件)だけでなく、それ以前におかれていた状態の影響を受けるためである。新しい条件に応じた流れが形成されるためには、その周辺の流体が完全に流れ去る必要があることになり、現象は流れの速度と境界条件との変化速度の比、すなわち無次元風速に支配されることになる。従って、この点からも、中振幅の応答は無次元風速に支配される一般的自励振動であると結論されよう。

安定な振幅の大きな振幅の例として $Y/D = 0.55$ について見てみる。円柱変位が 0 の時の圧力が 0 になっていないこと、上昇時の揚力ピークが準定常揚力より遅れていることから、この場合も流れの遅れが生じていることは明らかである。しかしながら、この振幅の場合、上昇時にのみスイッチングによるピークが生じているため、一周全体について見ると基本波は逆に位相が進んでいると見ることができる。換言すれば、この振幅でも負減衰の原因となる流れの遅れは生じているが、上昇時にのみ揚力ピークが生じることが揚力全体の位相を進め、正減衰に変化したものと言える。従って、上昇時にのみ揚力ピークを生じることが安定な振幅が生じる本質的な原因と言えよう。

上昇時にのみピークを生じる理由を調べるために、振動時の圧力分布(付図 5.1.2.1~2)を見てみる。図によれば、円柱が中立位置より上にある半周期の大部分において、 $\theta = 20^\circ \sim 45^\circ$ 付近に剥離剪断層が当たり、圧力が上昇する現象が続いていることが分かる。一方、ギャップフローによる大きな負圧が生じるのは円柱が最大変位に至る直前の限られた位置にある場合だけである。下降時には流れの遅れによって負圧発生位置が送れることを考察しても $C_p = -2$ に近いような負圧は見当らない。

図からは、後流域内にある状態　ギャップフロー　後流域内になる状態というようなスイッチングが起こっているのか定かではないが、いずれにしても、ある方向のギャップフローへのスイッチングの時のみ、大きな負圧が生じることは明らかであり、これが上昇時のみ揚力が生じる理由と言えよう。

ある方向へのギャップフローへスイッチングするためには、エネルギーの高い状態を越えなければならず、これを越えた瞬間、そのエネルギーがギャップフローの運動エネルギーとなって高速流を生むのではないかと推測されるが、詳細は今後の課題と言えよう。

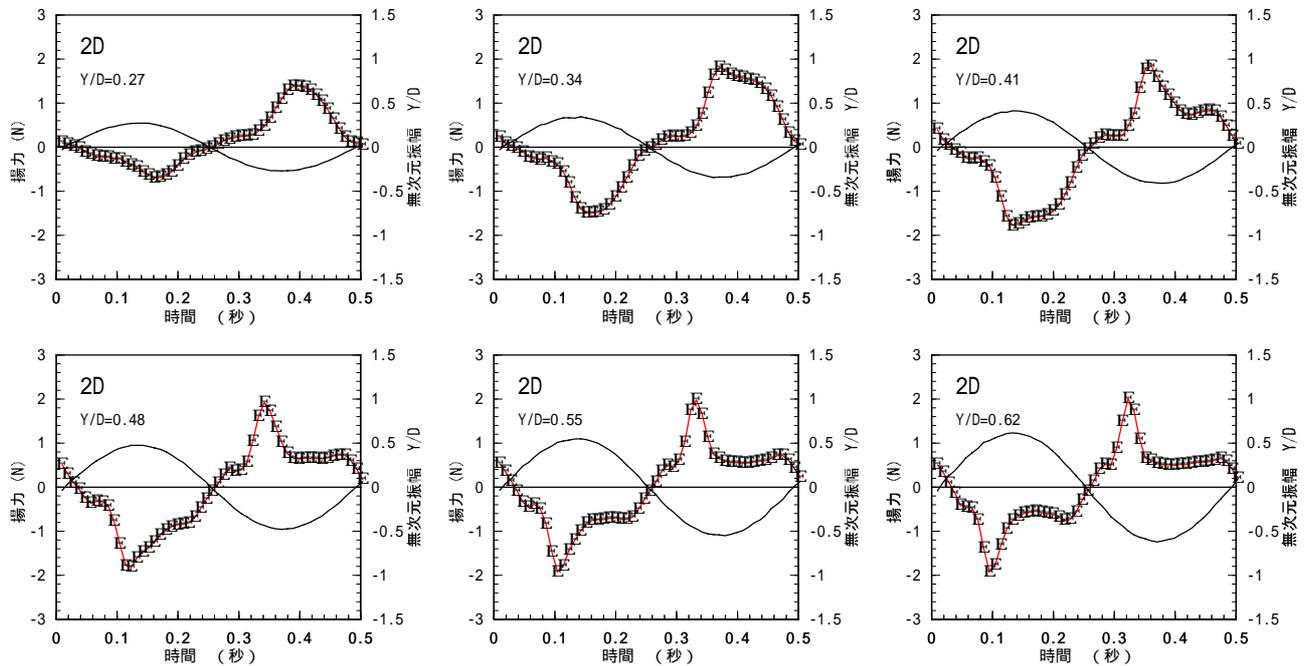


図 13 非定常揚力 風速 10.7m/s 加振振幅(Y/D)0.27 ~ 0.62

・間隔 3D の場合

図 14.1~2 は、円柱間隔 3D の場合の揚力変化を示したものである。代表例として粘性抵抗係数(図 10.2)に安定な振幅が明瞭に現れた風速 $V = 6.2\text{m/s}$ および 8.4m/s の場合を示した。図から、揚力変化は、定性的には 2D の場合と同様であり、小振幅では流れの遅れによる負減衰が、大振幅ではスイッチング時のピーク揚力による正減衰が生じていると言える。よって、3D の応答も典型的な空力減衰による自励振動と考えて支障はないであろう。

自由振動実験によれば、3D の応答と、2D の中振幅の応答の大きな差は、2D では振幅が風速によらずほぼ一定であったのに対して、3D では風速とともに漸加することにある。一方、揚力ピークはスイッチングが原因であり、スイッチングには下流側円柱の位置の影響が大きく、風速の寄与は小さいと考えられる。従って、安定な振幅がスイッチング時の揚力ピークによって定まるという既述の推論は、間隔 3D における風速とともに振幅が漸加するという応答を充分には説明できないことになる。

図 10.2 より、 $V = 6.2\text{m/s}$ では、不安定、 8.4m/s では安定と見られる振幅 $Y/D = 0.62$ に着目してみる。図 14.1~2 より、両風速における揚力波形は、一見似たような形を示しているが、揚力ピークの遅れは、 $V = 6.2\text{m/s}$ の方が大きい。無次元風速の増加は準定常状態に近付くことを意味するから、 $V = 6.2\text{m/s}$ の場合の遅れの方が大きいのは当然の結果と言える。この遅れは、揚力ピークによる進みを相殺する効果があるから、 $V = 6.2\text{m/s}$ の $Y/D = 0.62$ における応答を不安定化する方向にある。円柱が中立位置に戻る直前、すなわち、揚力ピークを過ぎて減少した揚力がほぼ一定値を保った後、逆方向に変化する直前の形を見ると、 $V = 6.2\text{m/s}$ では相対的に早い時刻から緩やかな減少が始まるのに対して、 $V = 8.4\text{m/s}$ では円柱が中立位置に戻る直前まで一定値を保つか、むしろ小さいながら若干のピークを示しているようにも見える。この傾向は図 14.2 の $Y/D > 0.7$ の大振幅でより顕著に現れている。これは、弱いながらも、円柱下降時にスイッチング効果が若干は現れていることを示しているのかもしれない。そうであれば、3 状態ス

イッチングが生じていることになるが、本実験の結果では資料不足であり、今後の課題である。いずれにせよ、この中立位置に戻る直前の揚力変化は、高風速である $V = 8.4\text{m/s}$ の場合の方が遅れが大きい。換言すれば、不安定化することを意味し、前記の揚力ピーク位置の変化とは逆の効果を持つことになる。

以上をまとめれば、間隔 3D における振幅は、安定化効果を持つ要素と不安定効果を持つ要素の微妙なバランスの結果として定まっているものと考えられよう。このような現象は箱桁のフラッタなどにも広く見られ、構造系あるいは気流条件などの影響で僅かにバランスが変化するだけで著しく異なった応答を生じる可能性を示唆するものであろう。工学的に考えれば、有効な制振対策を考える上で、貴重な知見と考える。

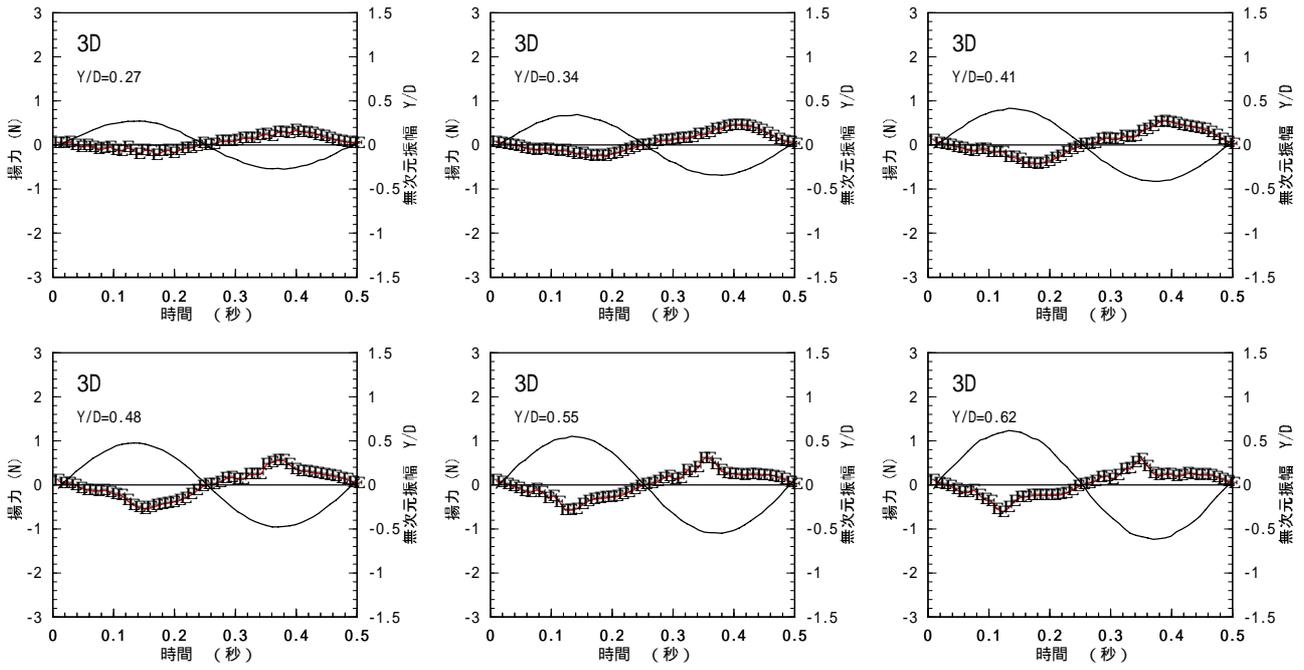


图 14.1 非定常揚力 風速 6.2m/s 加振振幅 (Y/D) 0.27 ~ 0.62

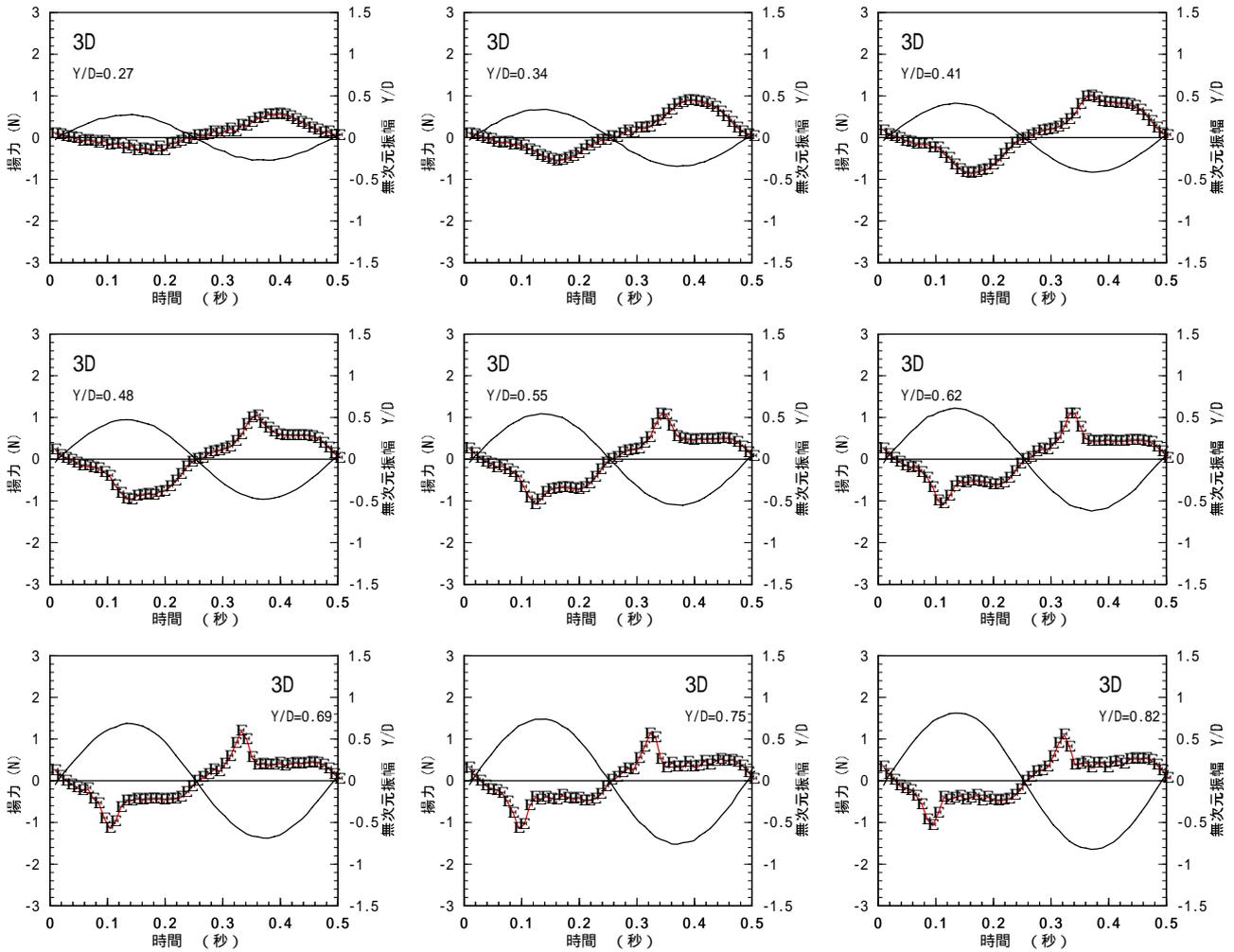


图 14.2 非定常揚力 風速 8.4m/s 加振振幅 (Y/D) 0.27 ~ 0.82

4.3.3 間隔 2D での大振幅振動に関する一解釈

間隔 2D での大振幅の応答、あるいは間隔 4D での応答は、実験結果の信頼性に問題があるとは言え、従来の一般的な自励振動の定式化では説明できない可能性が高い。一方、これらの応答には強制振動的な特徴が認められないことも事実であり、何らかの新しい形の空気力の定式化が必要のようにも思われる。

従来の空力振動に関する知見では理解が最も困難な現象は、間隔 4D における応答であろう。4D での非定常揚力には際立った特徴はなく、ほぼ準定常揚力に等しい。また、図 6 より、この揚力は純粋な復元力 $F = -kY$ の形に近いと考えられる。一般的な空力振動で、このような揚力にも拘らず自励振動が起こるケースでは、ほとんど準定常揚力に等しいが僅かに揚力の位相が遅れているのが普通である。図 11.2 の精度の問題はあるにせよ、粘性抵抗係数の正方向への変化がないとすれば、従来の知見では解釈不可能な現象と言ってよいであろう。

定常圧力測定結果より、下流側円柱の揚力を支配する要因はギャップフローへのスイッチングによる圧力変動と、上流側円柱後流内の圧力勾配の 2 つと考えられる。一方、後者は比較的単純な現象であると同時に 2D、3D を含めて下流側円柱の圧力場のバックグラウンド的な作用をしている可能性があるようにも思われる。具体的に言えば、スイッチングの影響が相対的に小さいと考えられる 2D での大振幅応答を説明できる可能性や 2D と 4D の中間的な特徴を持つ 3D の応答をより良く説明できる可能性などが考えられよう。

実験結果から直接的に考えられる定式化は、

$$F = -kY$$

の形であるが、この揚力は剛性変化をもたらすだけで自励振動の原因となり得ないことは自明である。そこで、図 6 の 2D、3D の揚力をも考慮して、矩形波状の揚力を仮定してみた。運動方程式は次の通りである。

$$m\ddot{Y} + c\dot{Y} + kY = \frac{Y}{\bar{Y}} A$$

$$\left\{ A = \text{揚力値}, Y = \text{変位}, \bar{Y} = Y \text{の絶対値} \right\}$$

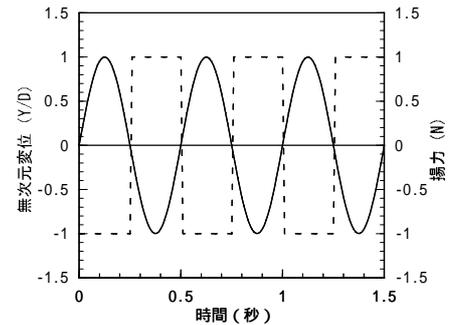


図 15 仮定された揚力

解析方法

数値解析に使用したプログラムは、市販のソフトウェアに用意されている常微分方程式の関数である。解析モデルの質量 (m)、粘性抵抗係数 (c) は、自由振動応答実験のモデル 2 ケースの平均値とし、剛性 (k) は、非定常圧力測定に加振周波数 (2Hz) と解析モデルの固有振動数が等しくなるように算出した。揚力 A は大振幅の発振風速が 10m/s 以上であったことから、10m/s 以上の非定常揚力測定値を参考に、1(N)、1.5(N)、2(N) を入力した。また、初期変位 (Y_0) は、円柱間隔 2D の大振幅が 1D 程度 (約 32mm) であることから、10mm ~ 60mm (10mm ピッチ) の 6 ケースとし、初期速度は全ての解析で 0 とした。基本的な解析条件を表 4 に示す。

表 4 数値解析 解析条件

質量 m (kg)	2.046
剛性 k (N/m)	325.360
粘性抵抗係数 c (N·sec/m)	0.042
揚力 A (N)	1 1.5 2
初期変位 Y_0 (mm)	10 ~ 60 (10 ピッチ)
初期速度	0

数値解析の結果

数値解析結果を図 16.1 ~ 3 に示す。各図の上部に基本条件である揚力 (A) と初期変位 (Y_0) を記した。また、解析によって得られた変位波形の周波数 (Freq) を求め同位置に記した。図の縦軸は変位 (mm)、横軸は時間 (sec) である。

図からも明らかなように振動特性は初期変位によって異なる。図 16.1 から、初期変位が 10 (mm) の場合は、振幅が時間の経過とともに 0 (mm) に漸近する自由減衰振動を示した。初期変位が 20 (mm) の場合は、5 (sec) まで発散振動を示し、その後、一定振幅 20 (mm) に収束する。それ以上の初期変位では、解析開始とともに減衰振動を示し、振幅 30 (mm) 弱程度で安定な振動状態に至る。固有振動数は、安定な振動状態が発現する場合は 2.2Hz 前後であるが、自由減衰振動では 2.5Hz と若干高い値を示した。

図 16.2 ~ 3 においては、入力する揚力が増加すると、振動が発現する初期変位、および安定な振幅が増加していることが認められる。固有振動数も入力した揚力に比例して高い値を示すが、定性的な特徴は図 16.1 と同様と認められる。

解析条件の揚力 3 ケースの結果から、振動が発現する初期変位、安定な振幅、固有振動数の絶対量は、入力された揚力によって異なるものの、揚力の増加に伴って何れの値も増加するといった振動特性を有していることが分かる。仮定された式は、復元力項に相当する空気力であるため固有振動数の増加は説明できるが、負減衰項が存在しないにも関わらず安定な振幅で振動が発現することは非常に興味深い。一般的には、空力負減衰が系に作用することで自励振動となるが、前述した式のように、非線型な空力復元力が作用した場合でも自励振動が発生することが明らかとなった。

ここで導入した揚力は測定結果に基づくものではないから、定量的に現象を説明できるわけではない。しかしながら、従来の空気力の遅れ (速度比例成分) による負減衰がなくとも自励振動が生じることは説明されたと言えよう。このことは流れの遅れとは別のメカニズムで自励振動が生じ得ることを示しているから、間隔 2D の大振幅応答が無次元風速ではなく実風速に支配されることを矛盾なく説明できる可能性もあるのではないかと考えられる。

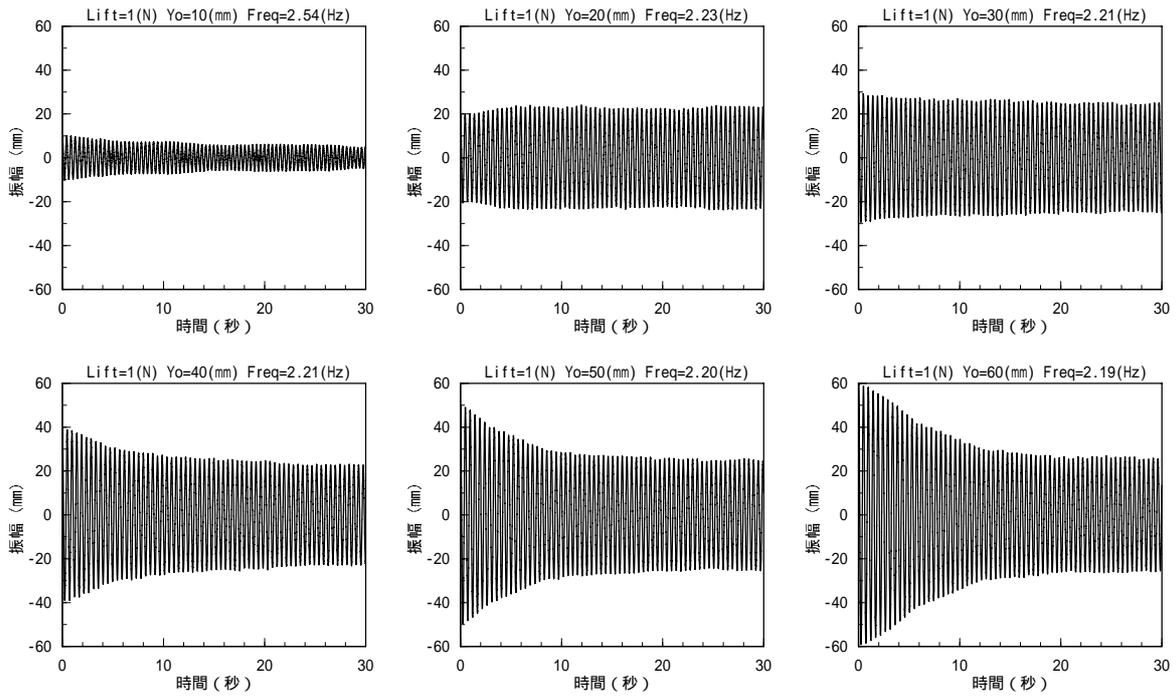


図 16.1 数值解析結果 揚力 $A = 1(N)$

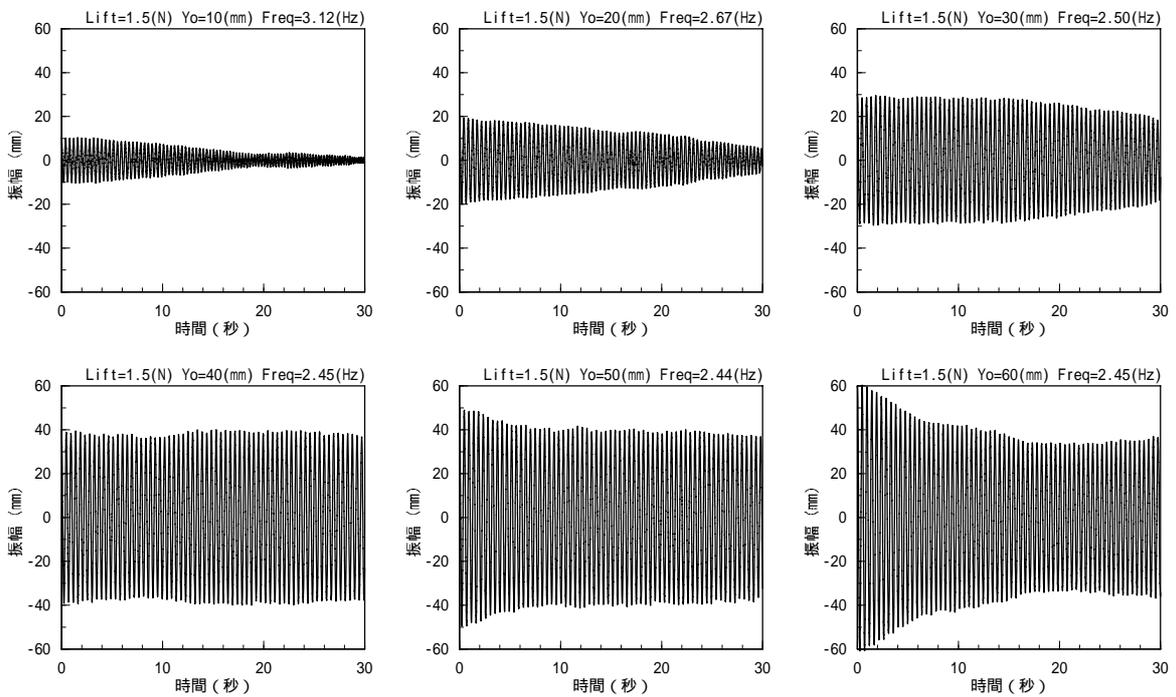


図 16.2 数值解析結果 揚力 $A = 1.5(N)$

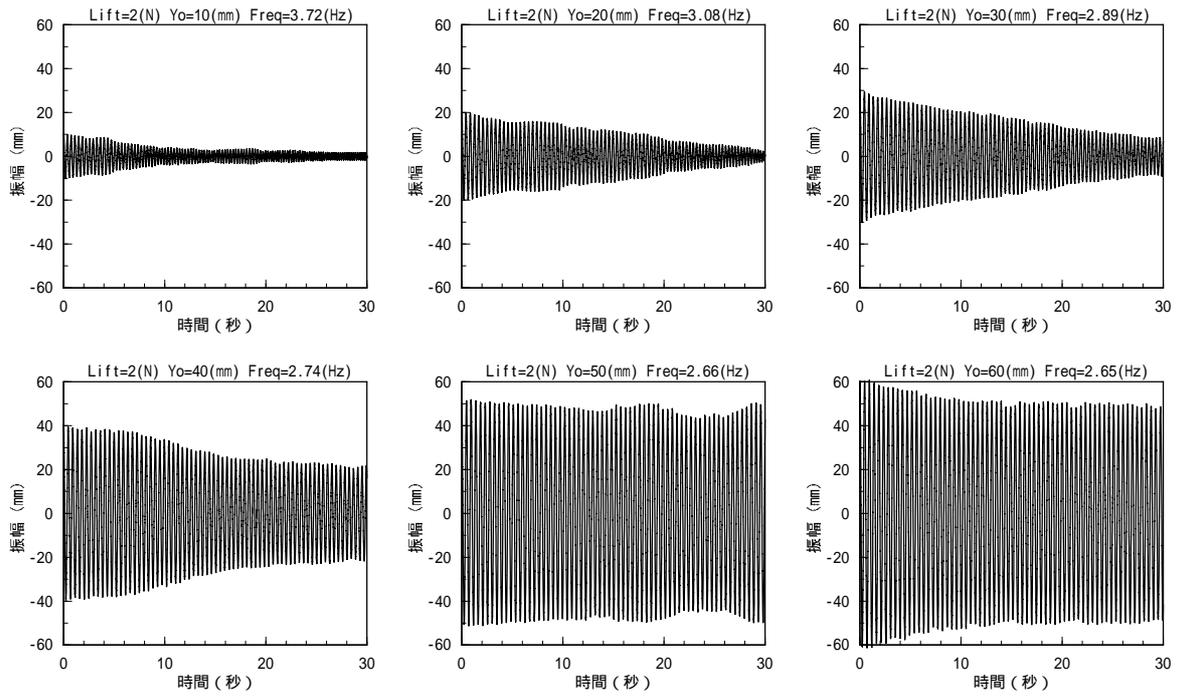


図 16.3 数值解析結果 揚力 $A = 2(N)$

4.4 非定常圧力特性のまとめ

円柱間隔 2D の大振幅を除いた場合は、自励振動理論によって説明できる。

また、間隔 2D の大振幅と間隔 4D は、新しい運動方程式によって説明できる可能性がある。

間隔 3D の振幅は、安定要素と不安定要素のバランスによって定まる。

ギャップフローは正減衰として作用する。

5 結論

自由振動応答、揚力とも円柱間隔によって大きく変化する。

円柱間隔 $2D$ はハード型応答、間隔 $3D$ と $4D$ はソフト型応答を示す。

間隔 $2D$ の大振幅の停止風速は、実風速によって整理できる可能性が高い。その他の応答は無次元風速で整理できると思われる。

下流側円柱に作用する揚力は、ギャップフローと上流側円柱の後流が形成する圧力場によって生じられると思われた。従って、円柱間隔が異なれば両者のバランスが変化するため、揚力が顕著に変化したと推定される。

間隔 $2D$ の中振幅の応答や、 $3D$ の応答は自励振動理論で説明できる。発散の原因は、一般空力不安定現象と同様に流れの遅れであり、振幅を定める正減衰は流れのスイッチングによって発生する。

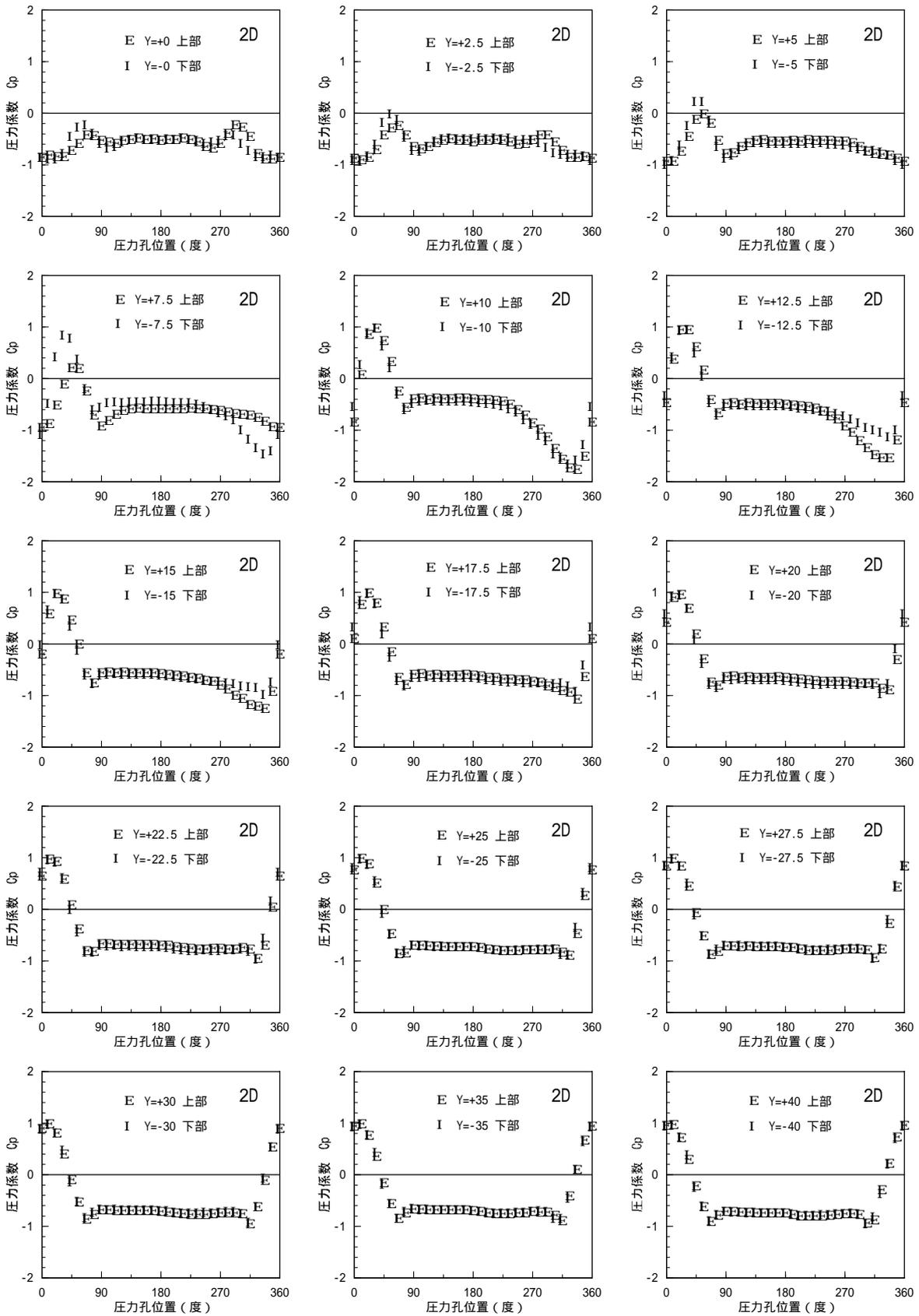
間隔 $2D$ の大振幅の応答や $4D$ の応答は、従来の自励振動理論では説明できない可能性が高い。矩形的に変化する揚力を仮定した解析によれば、空力負減衰がなくとも、自励振動的な振動が発生することが分かった。

6 今後の課題

間隔 2D の大振幅に関しては、依然として現象を説明する理論は明らかでないが、本研究で試みた空気力の定式化でも自励振動が発生することが判明した。解析の便宜上、変位に依存した矩形波揚力を仮定したため、測定揚力値を定式に忠実に入力した詳細な解析は今後の課題である。

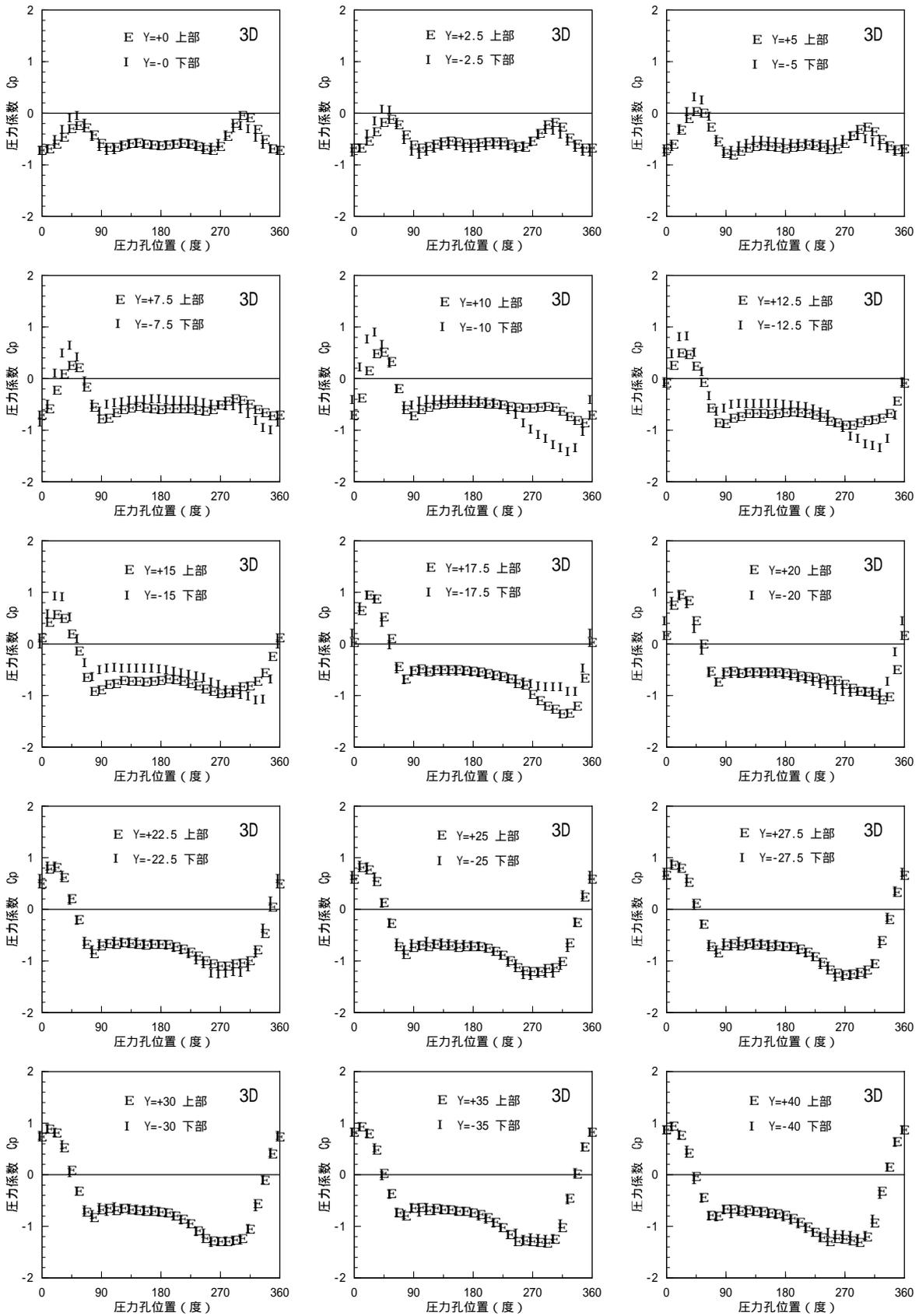
また、現象を支配する揚力は、ギャップフローによる負圧と、上流側円柱の後流によって形成される圧力場に起因すると推定された。従って、速度分布、静圧分布などの測定をおこなうことで、それらの存在をより明確にする必要がある。





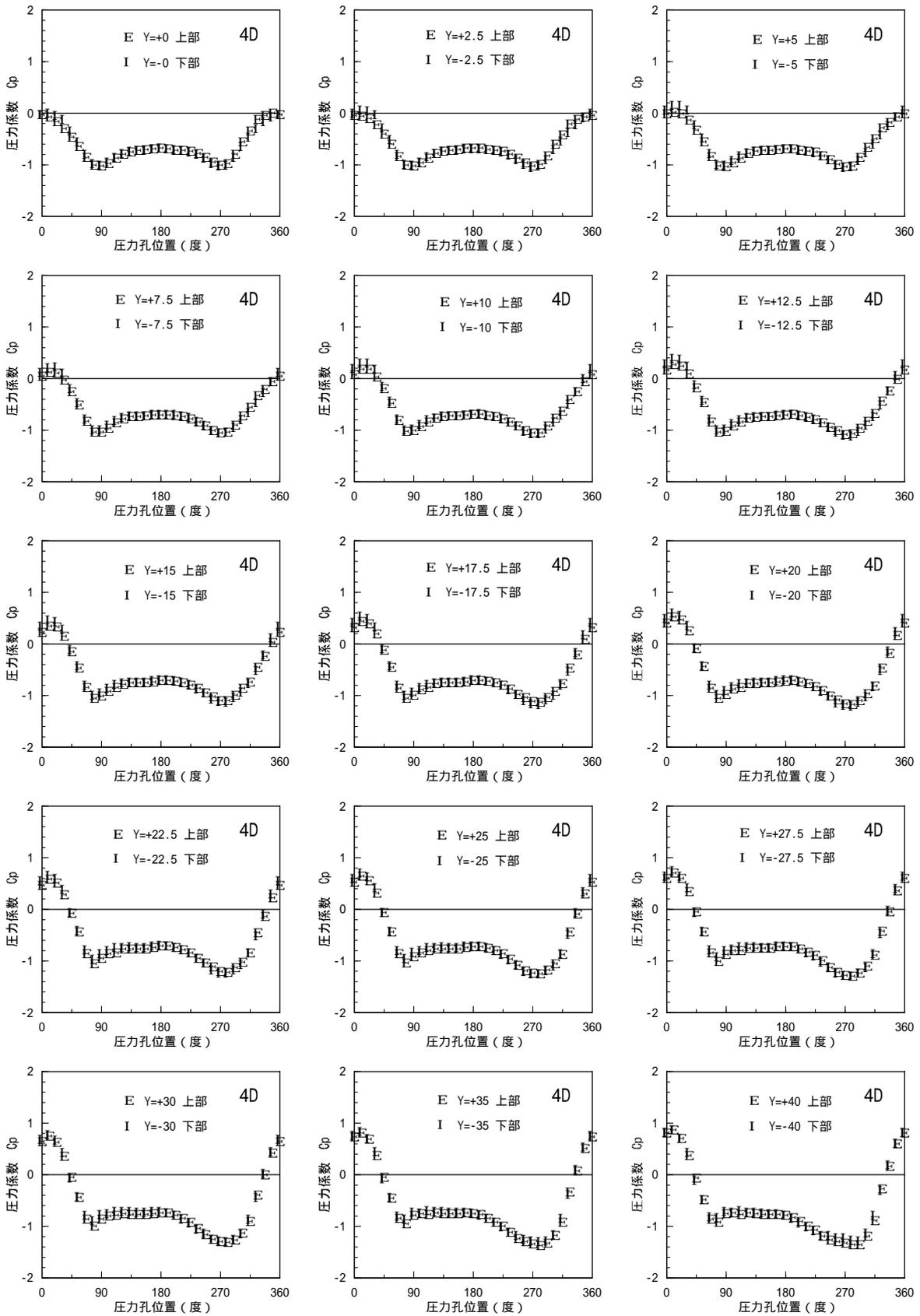
付図 1.1 定常圧力測定 下流側円柱表面の圧力係数の対称性

円柱間隔 2D 風速 10.7m/s



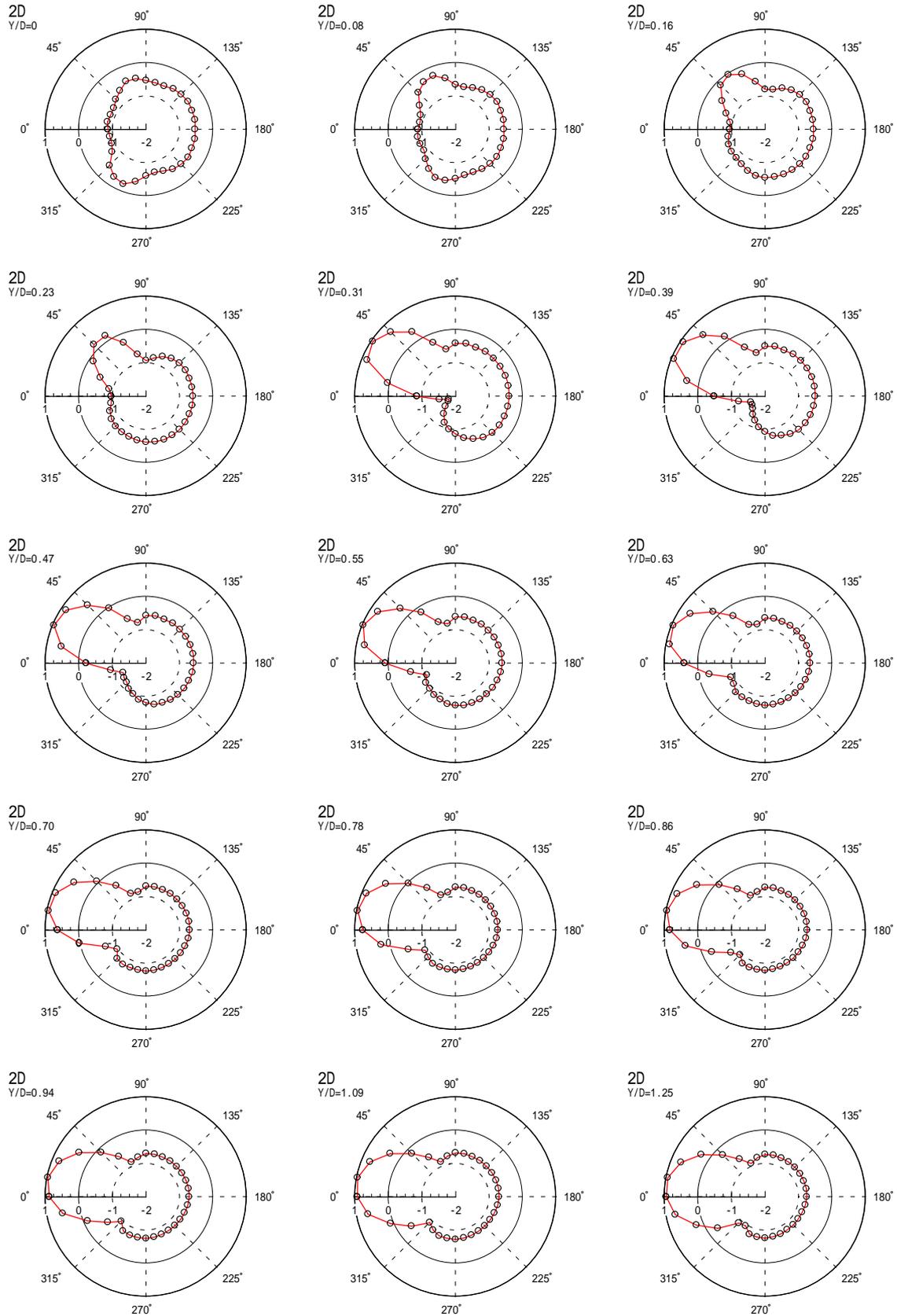
付図 1.2 定常圧力測定 下流側円柱表面の圧力係数の対称性

円柱間隔 3D 風速 10.7m/s



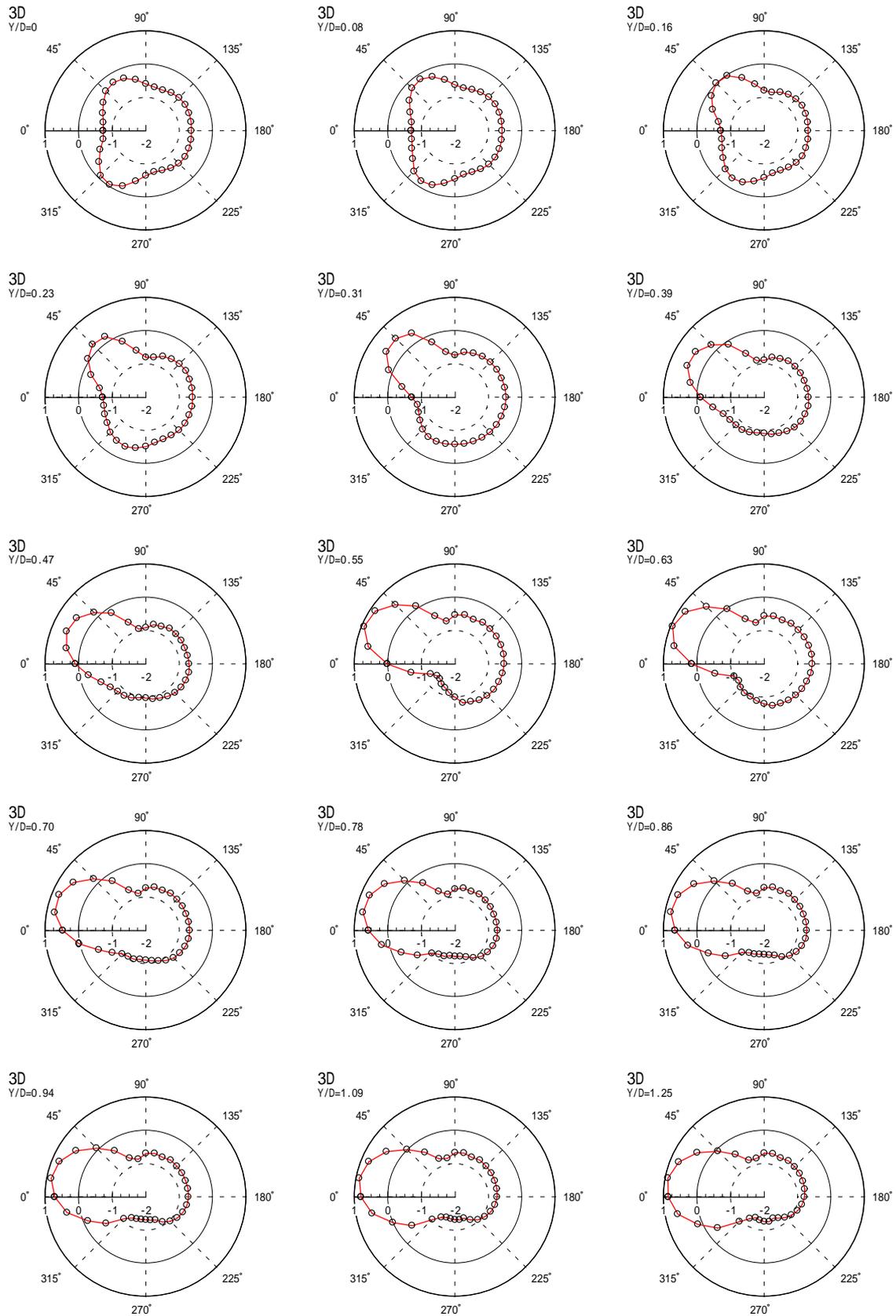
付図 1.3 定常圧力測定 下流側円柱表面の圧力係数の対称性

円柱間隔 4D 風速 10.7m/s



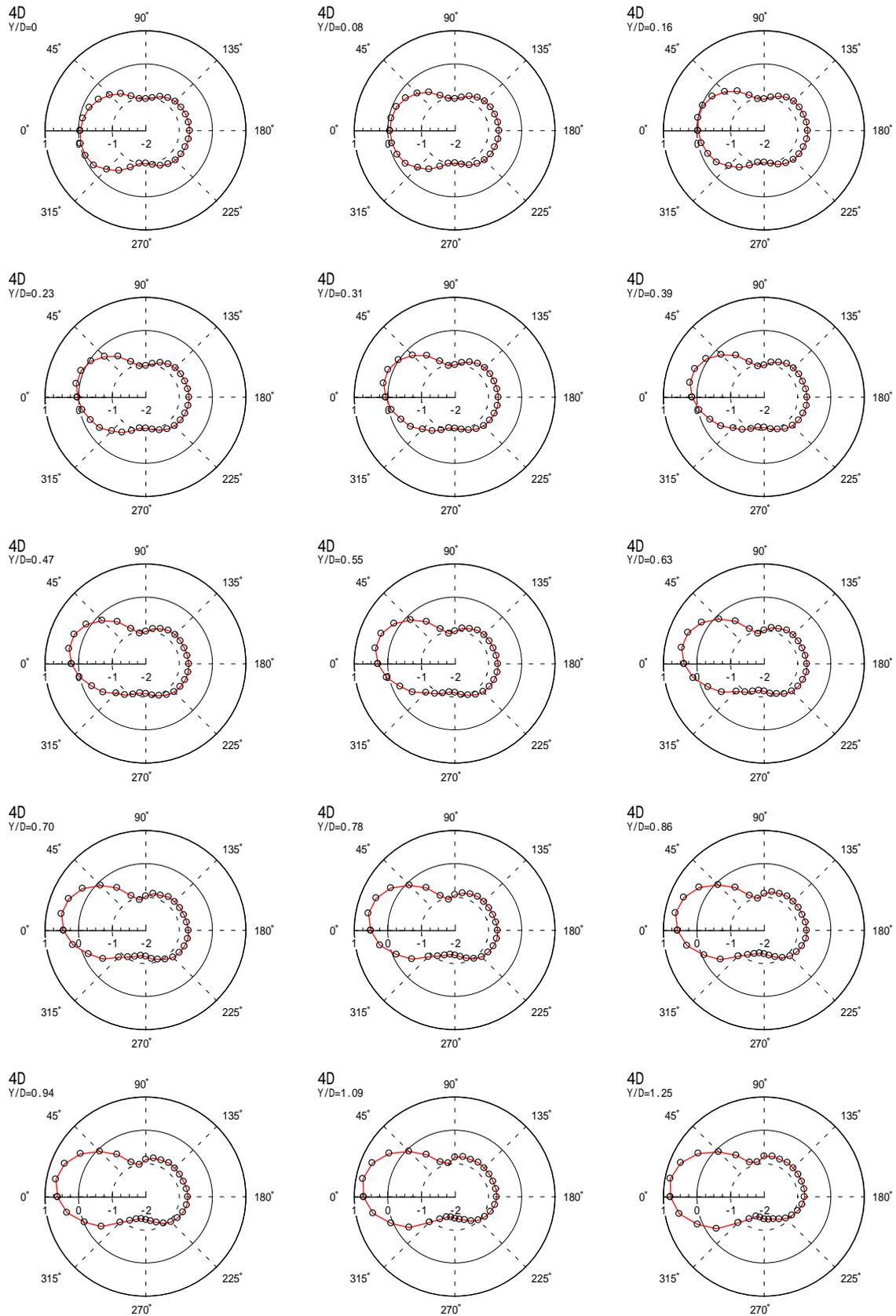
付図 2.1 定常圧力測定 各変位時の下流側円柱表面の圧力係数

円柱間隔 2D 風速 10.7m/s



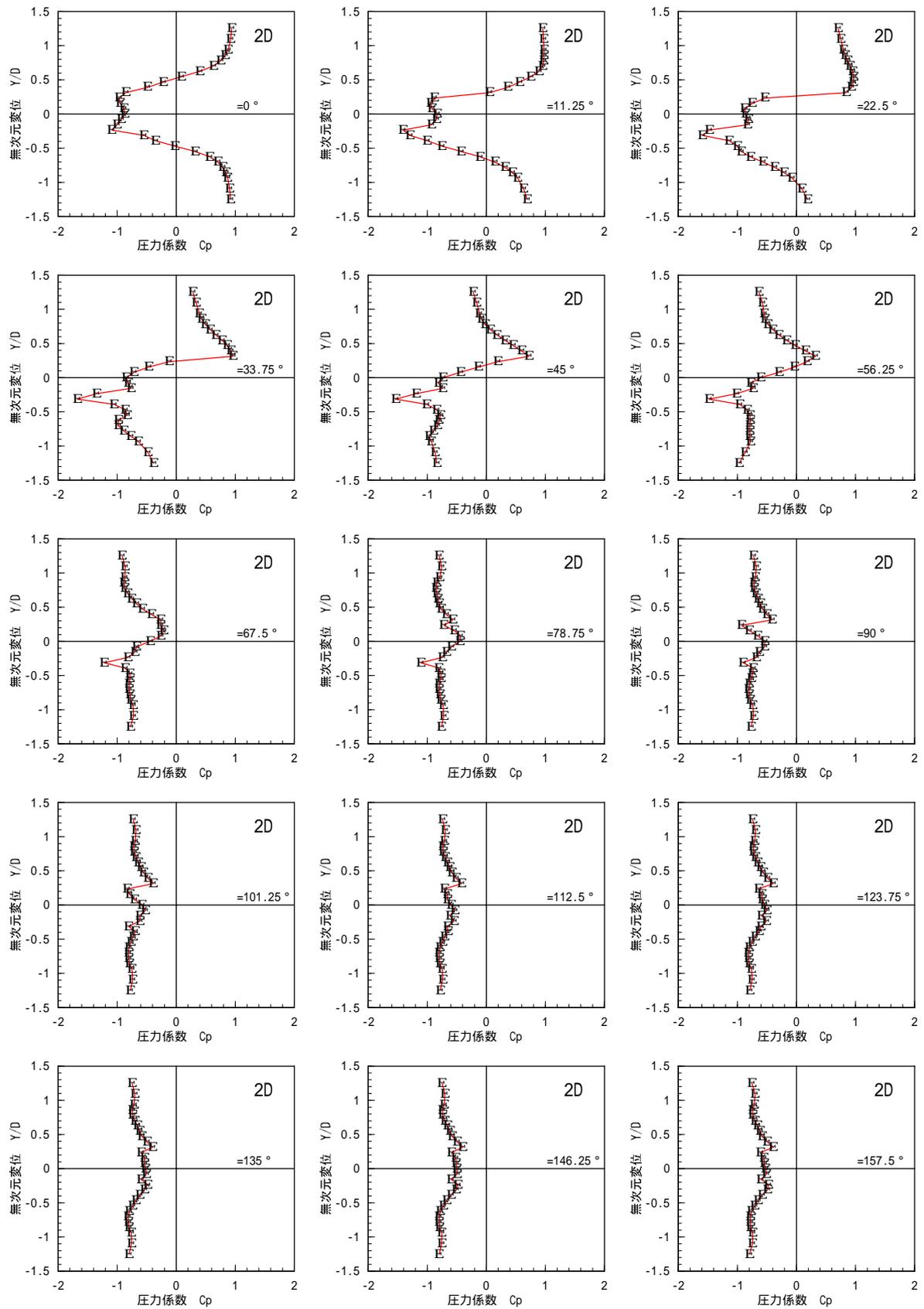
付図 2.2 定常圧力測定 各変位時の下流側円柱表面の圧力係数

円柱間隔 3D 風速 10.7m/s



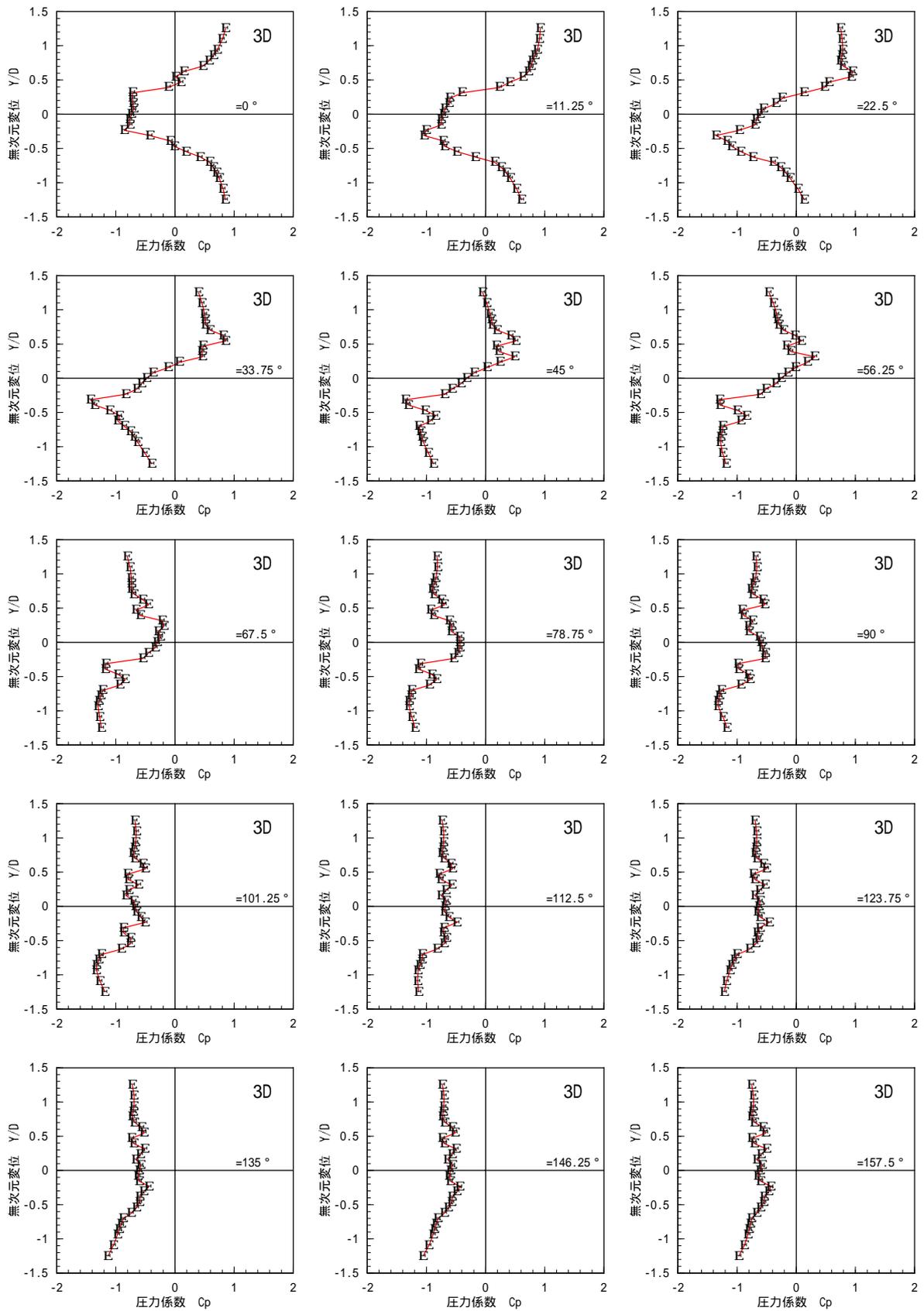
付図 2.3 定常圧力測定 各変位時の下流側円柱表面の圧力係数

円柱間隔 4D 風速 10.7m/s



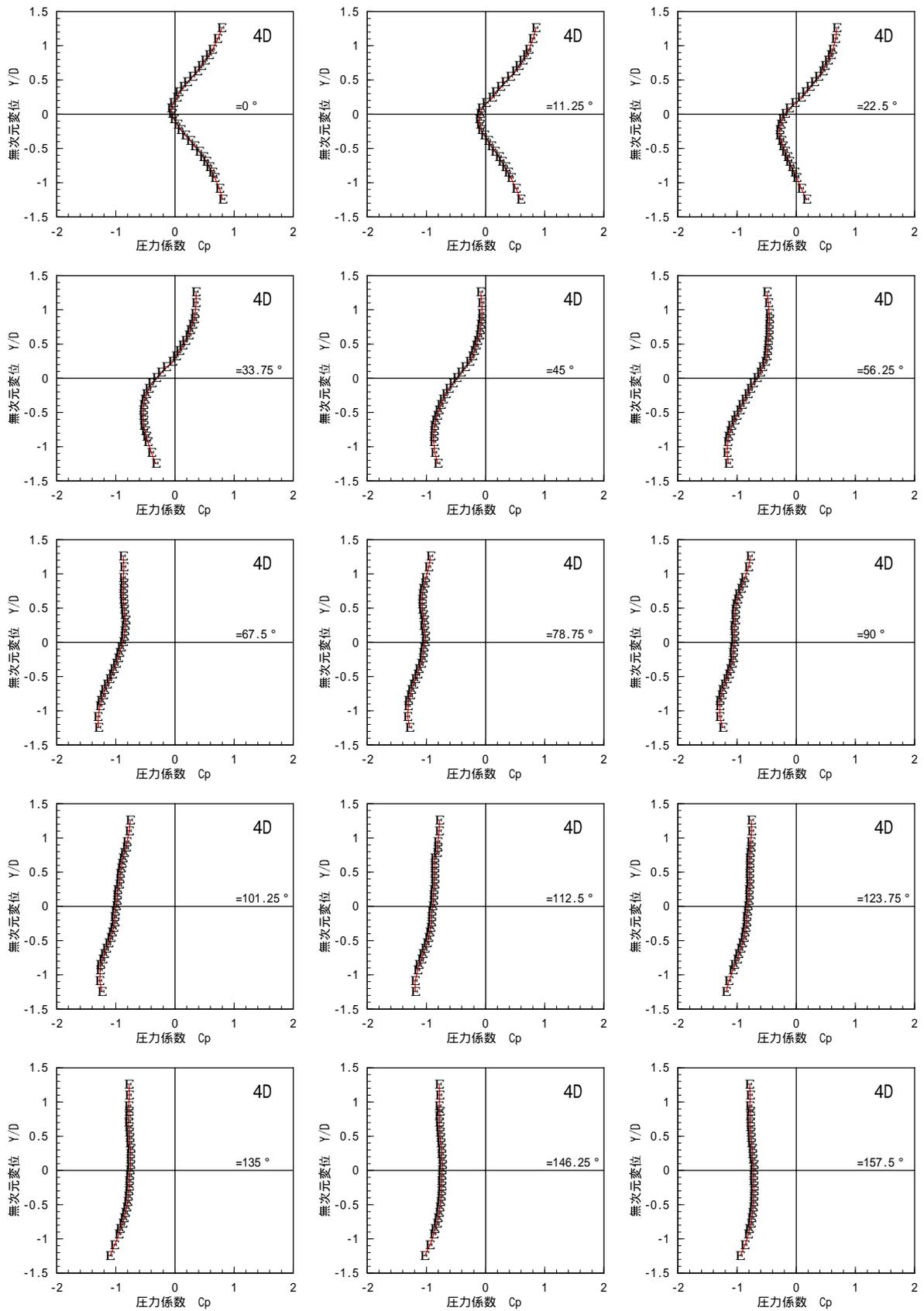
付図 3.1 定常圧力測定 各圧力孔の変位と圧力係数の関係

円柱間隔 2D 風速 10.7m/s ($=0 \sim 157.5^\circ$)



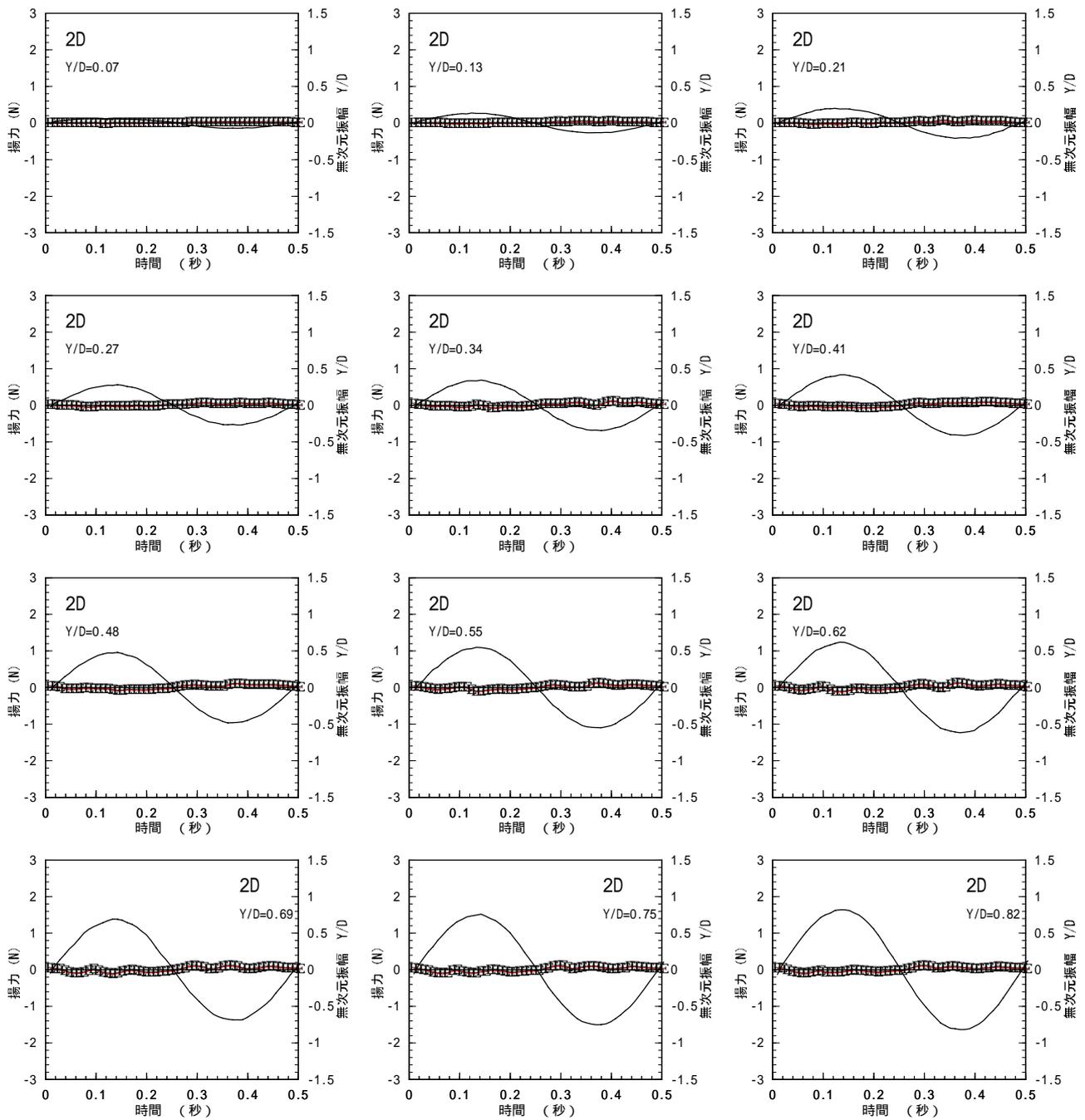
付図 3.2 定常圧力測定 各圧力孔の変位と圧力係数の関係

円柱間隔 3D 風速 10.7m/s (=0 ~ 157.5 °)



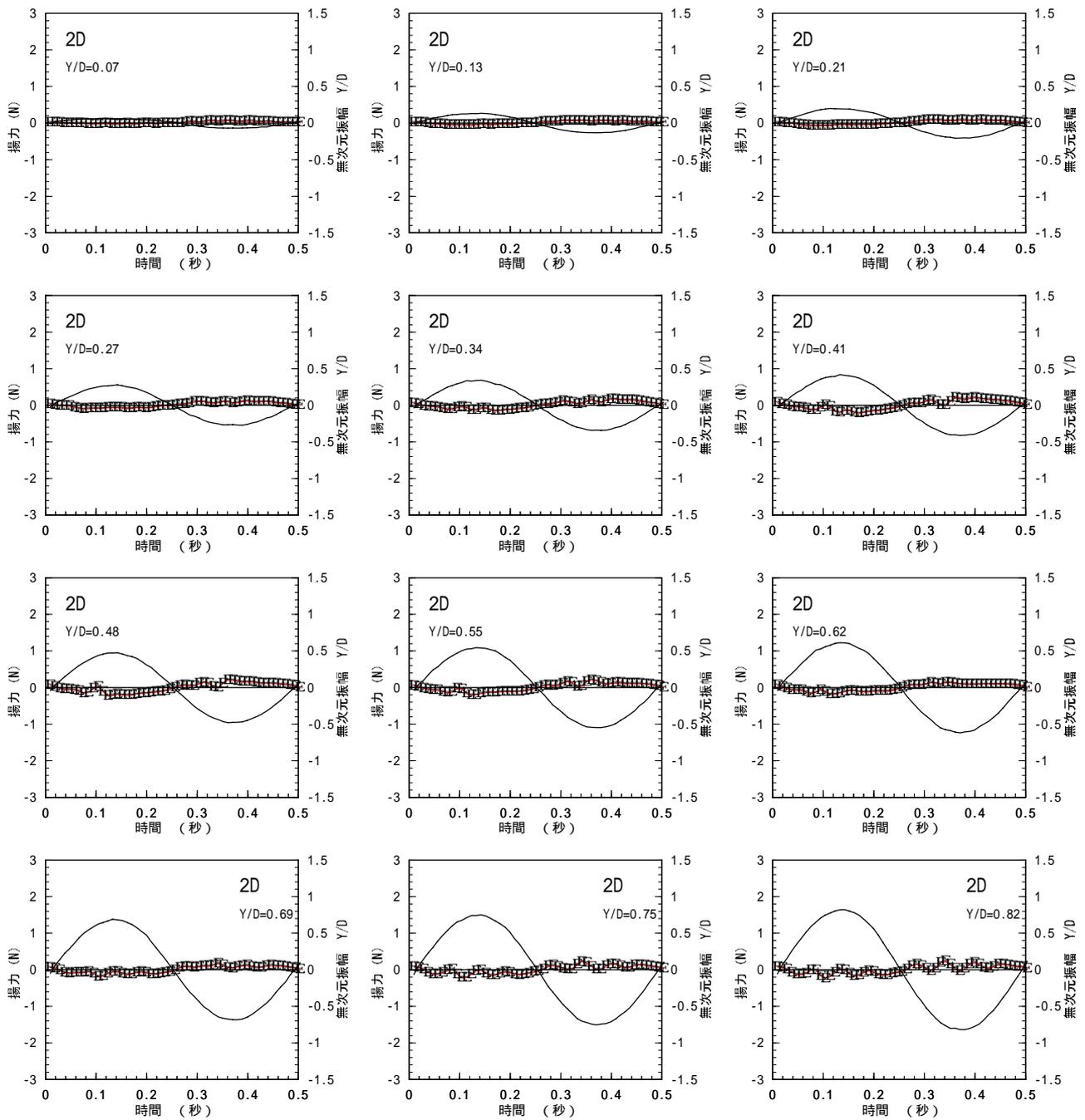
付図 3.3 定常圧力測定 各圧力孔の変位と圧力係数の関係

円柱間隔 4D 風速 10.7m/s (=0 ~ 157.5 °)



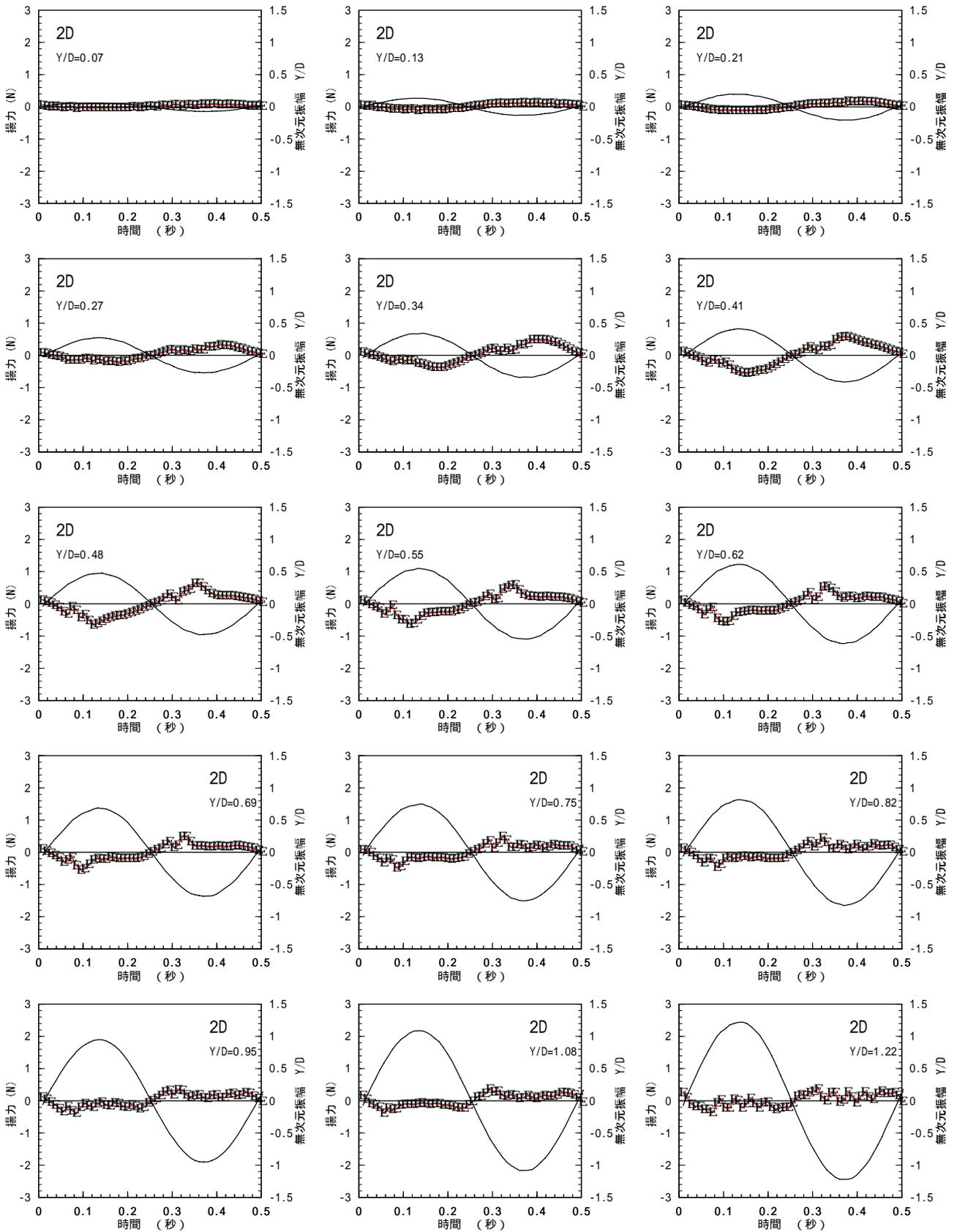
付図 4.1.1 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 2D 風速 (V) 2.9m/s



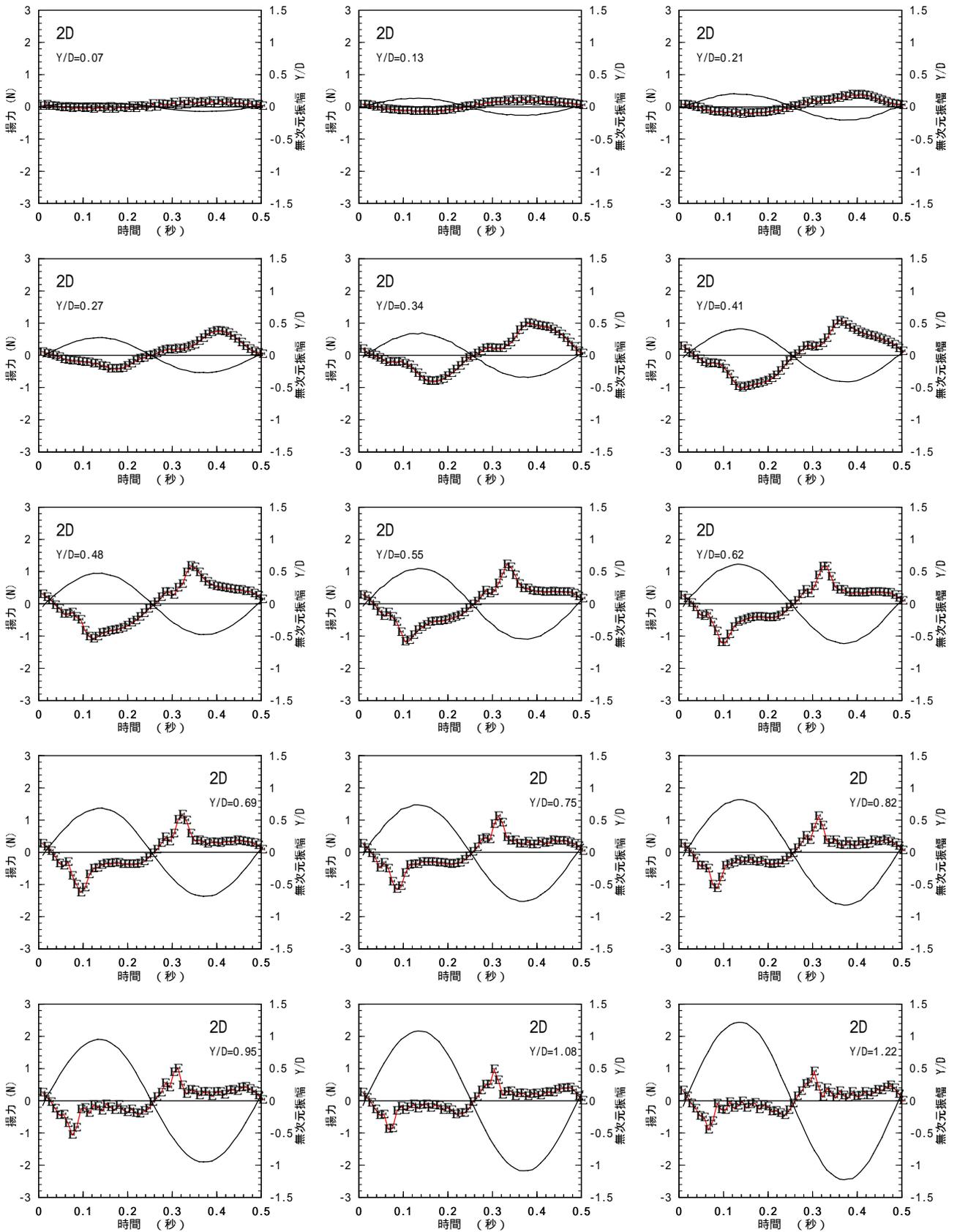
付図 4.1.2 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 2D 風速 (V) 4.0m/s



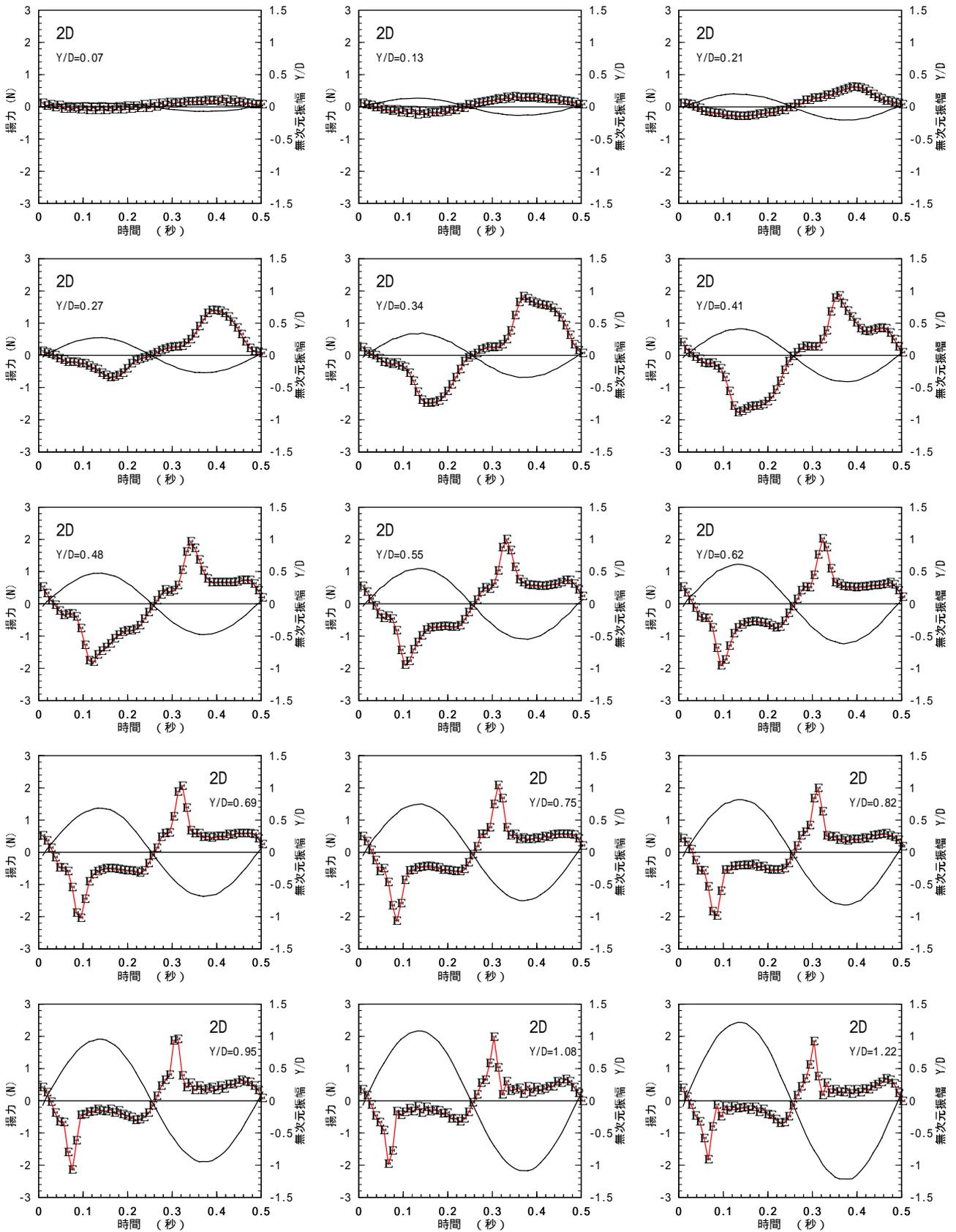
付図 4.1.3 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 2D 風速 (V) 6.2m/s



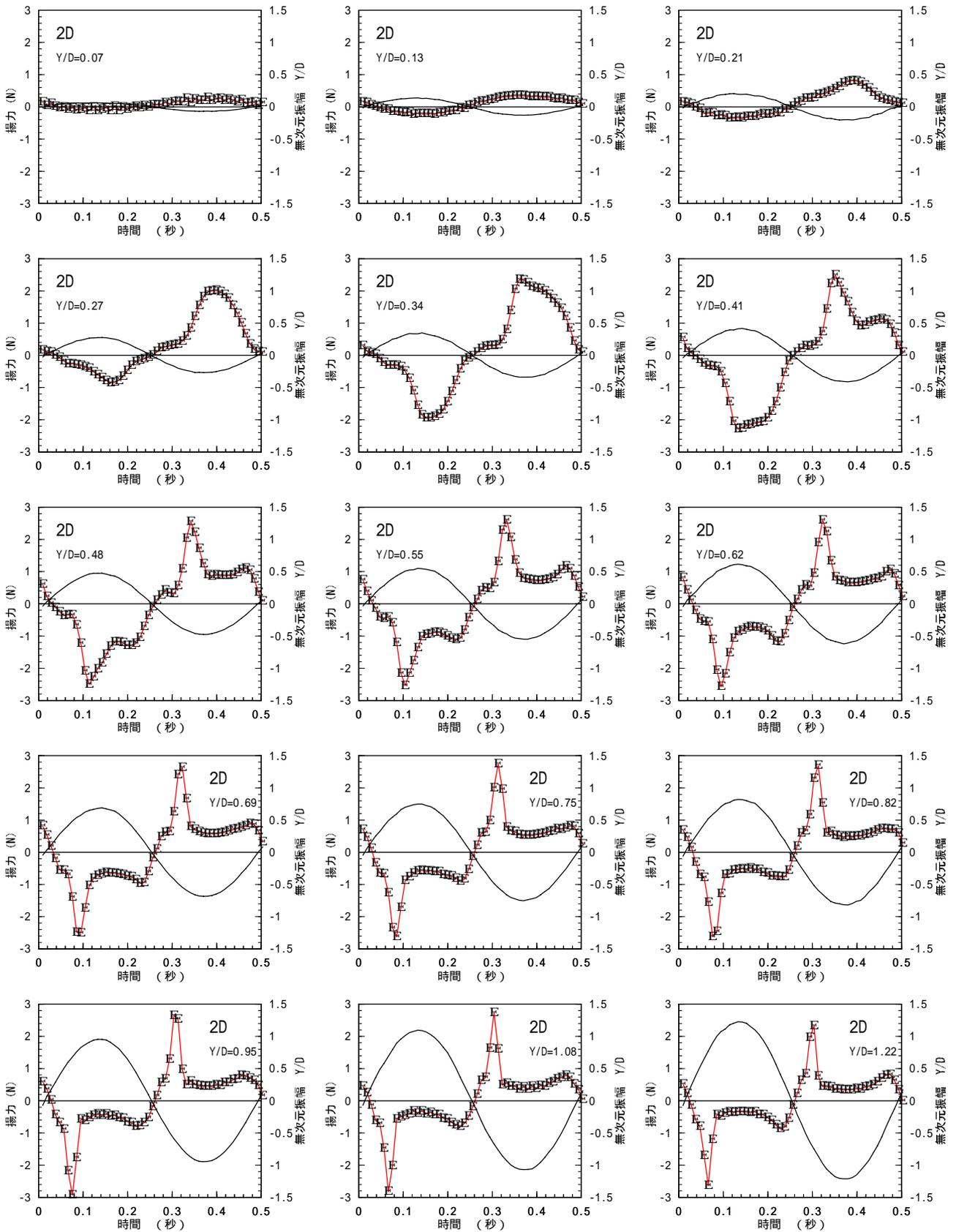
付図 4.1.4 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 2D 風速 (V) 8.4m/s



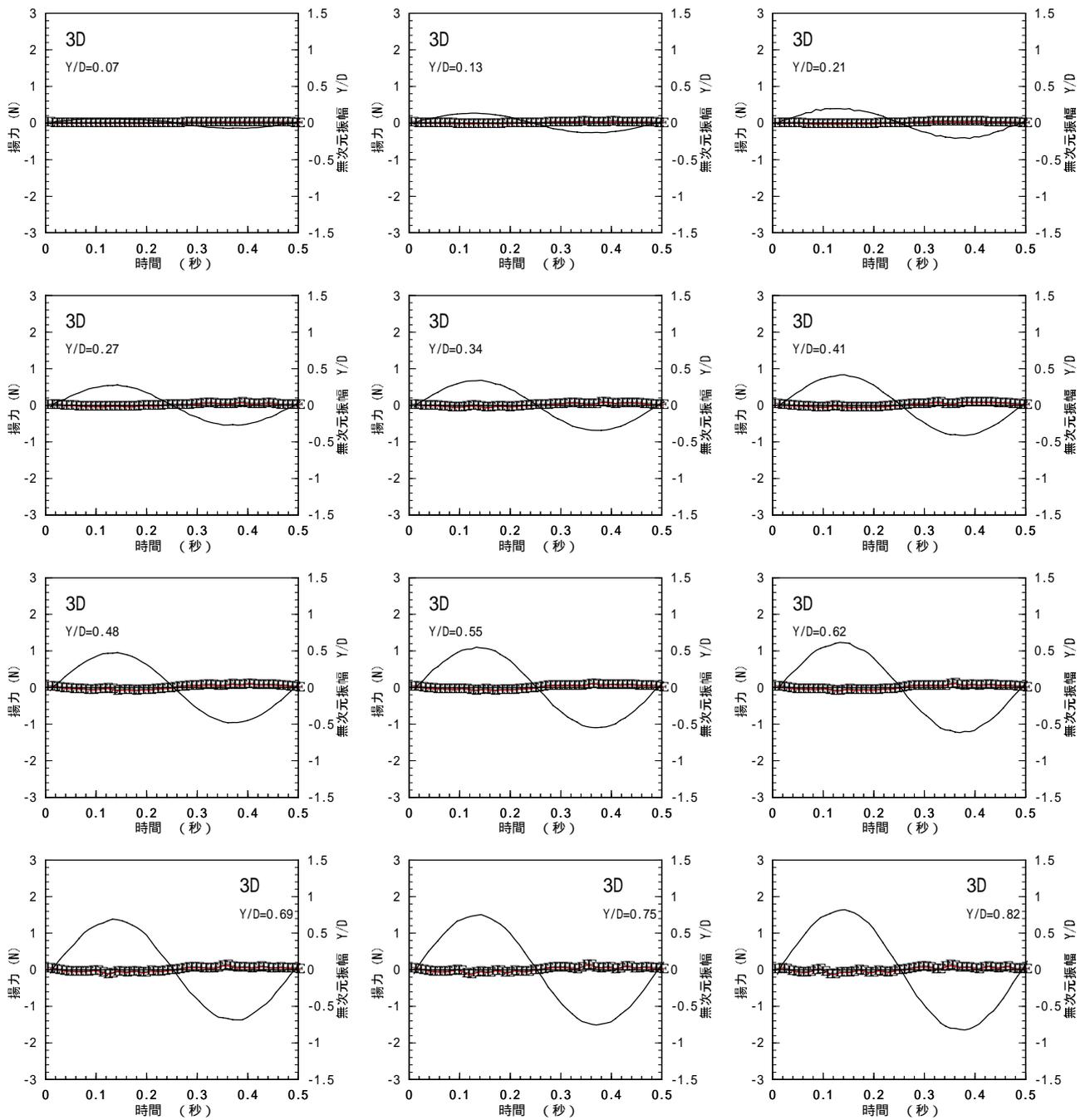
付図 4.1.5 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 2D 風速 (V) 10.7m/s



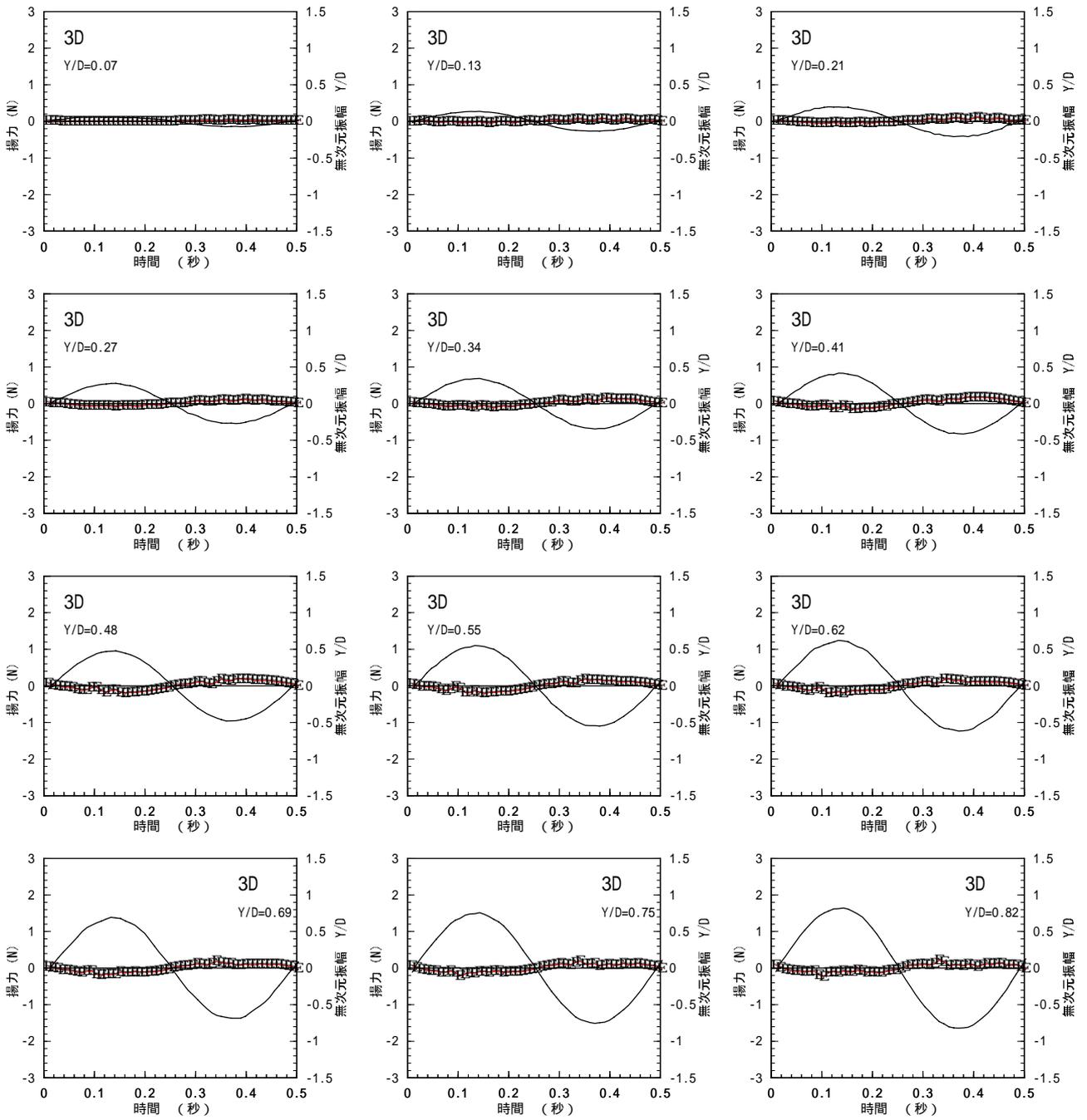
付図 4.1.6 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 2D 風速 (V) 12.3m/s



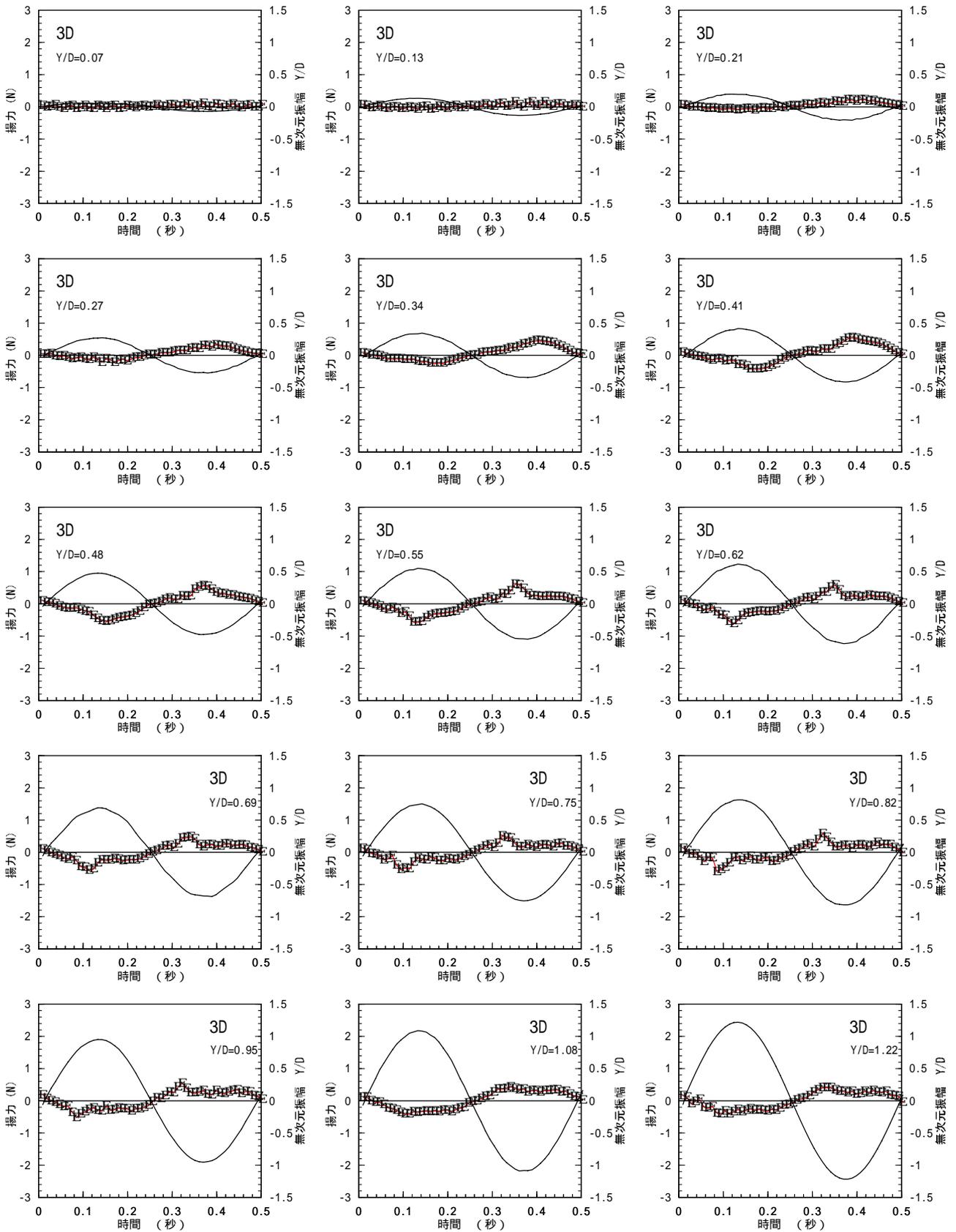
付図 4.2.1 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 3D 風速 (V) 2.9m/s



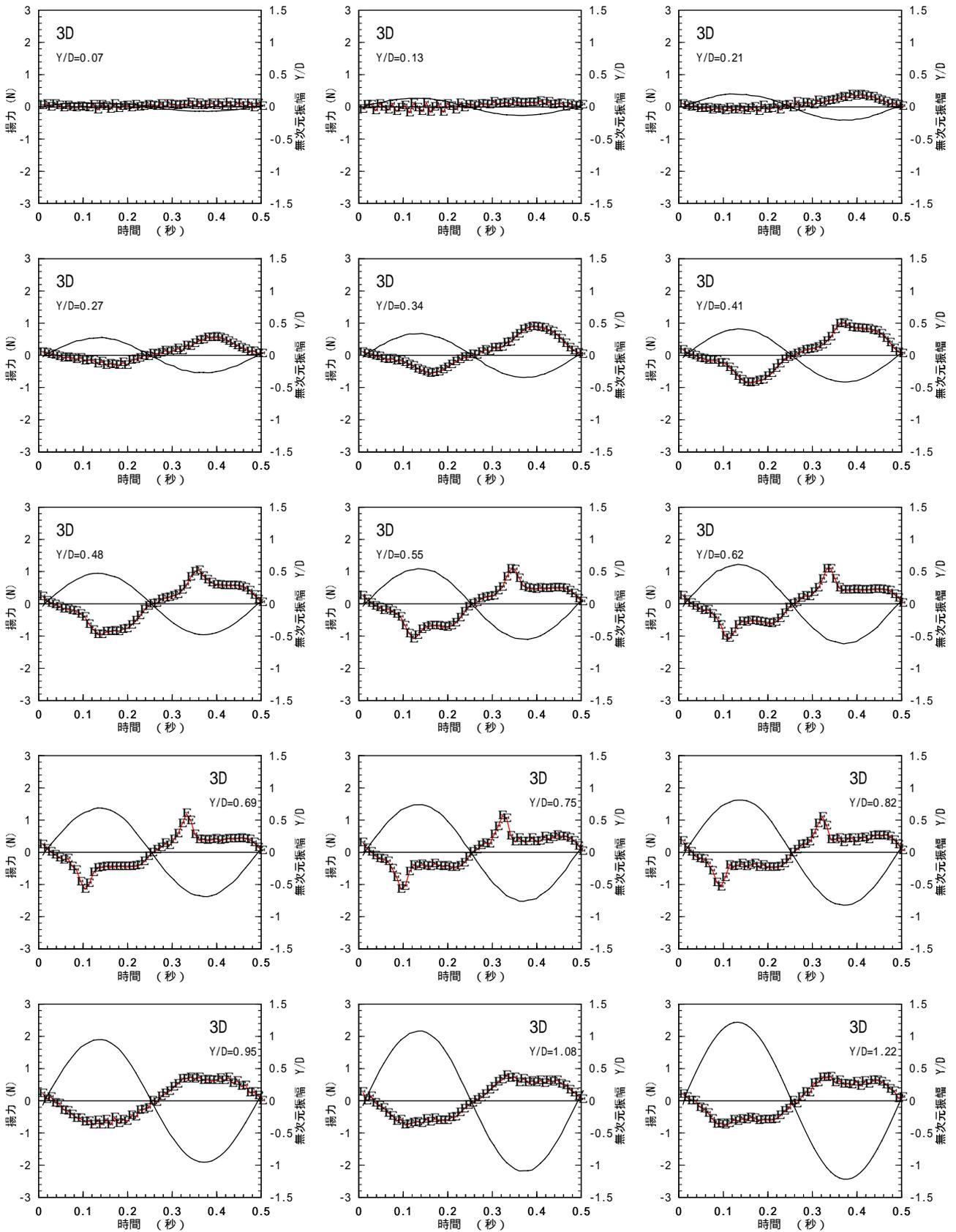
付図 4.2.2 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 3D 風速 (V) 4.0m/s



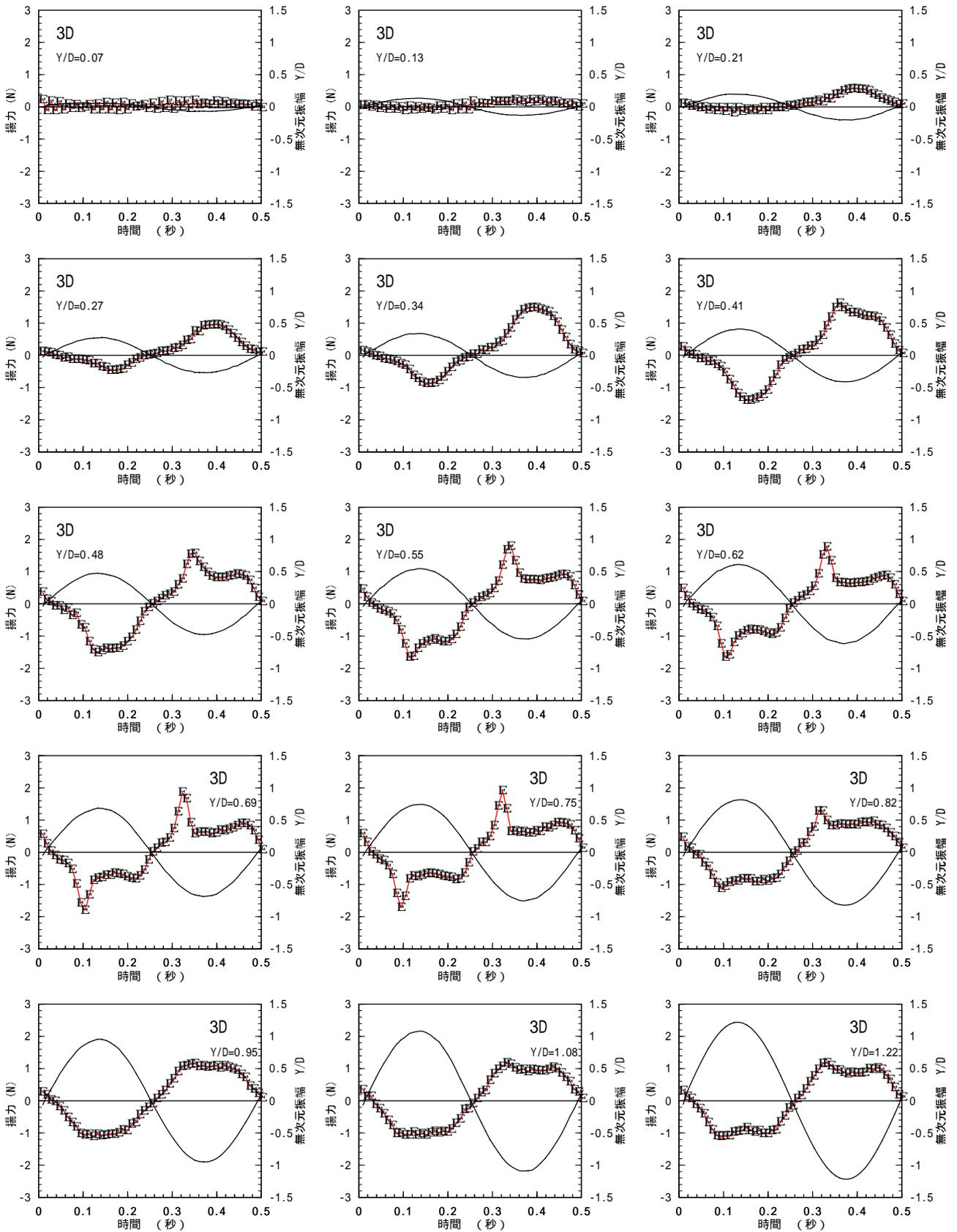
付図 4.2.3 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 3D 風速 (V) 6.2m/s



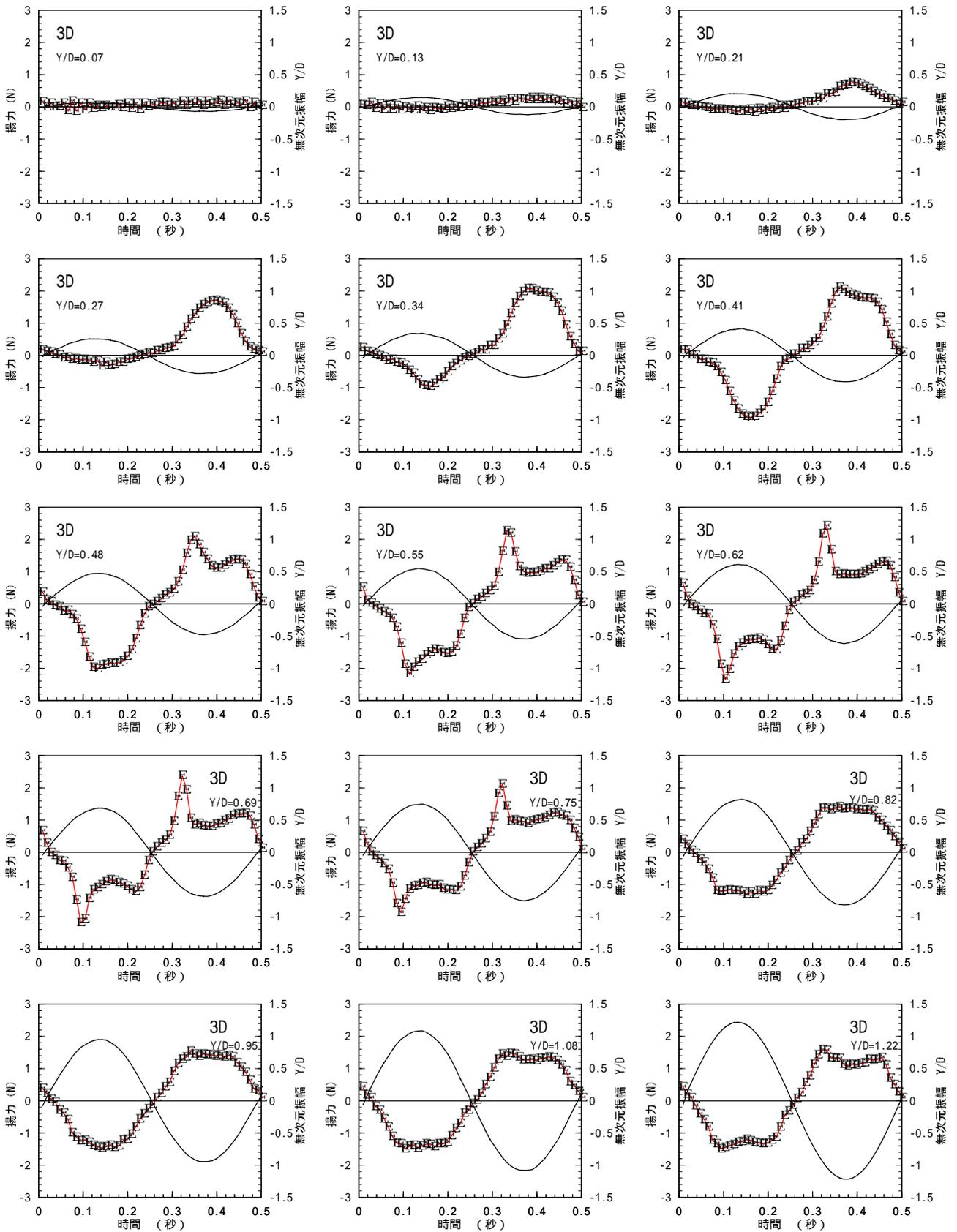
付図 4.2.4 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 3D 風速 (V) 8.4m/s



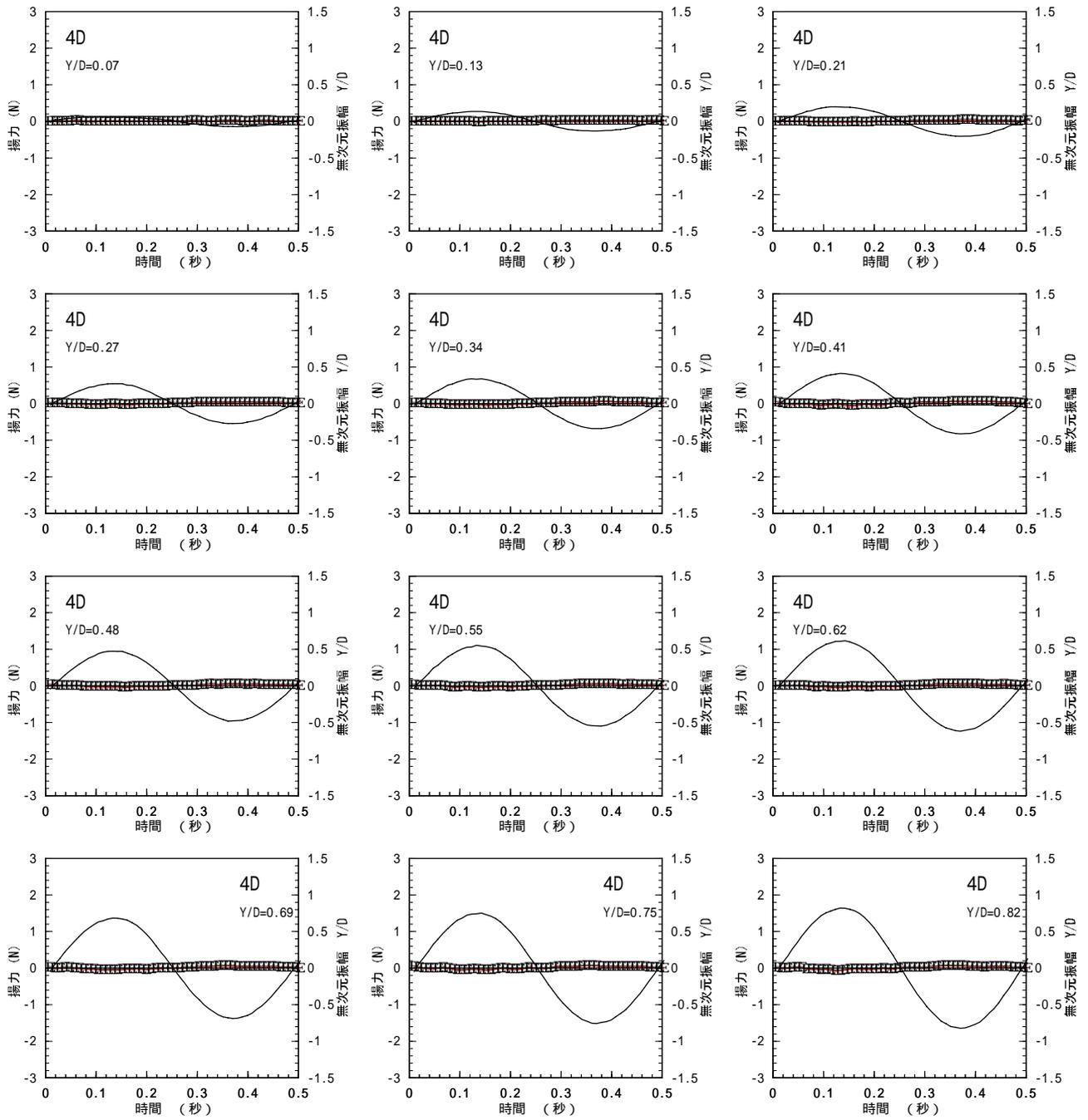
付図 4.2.5 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 3D 風速 (V) 10.7m/s



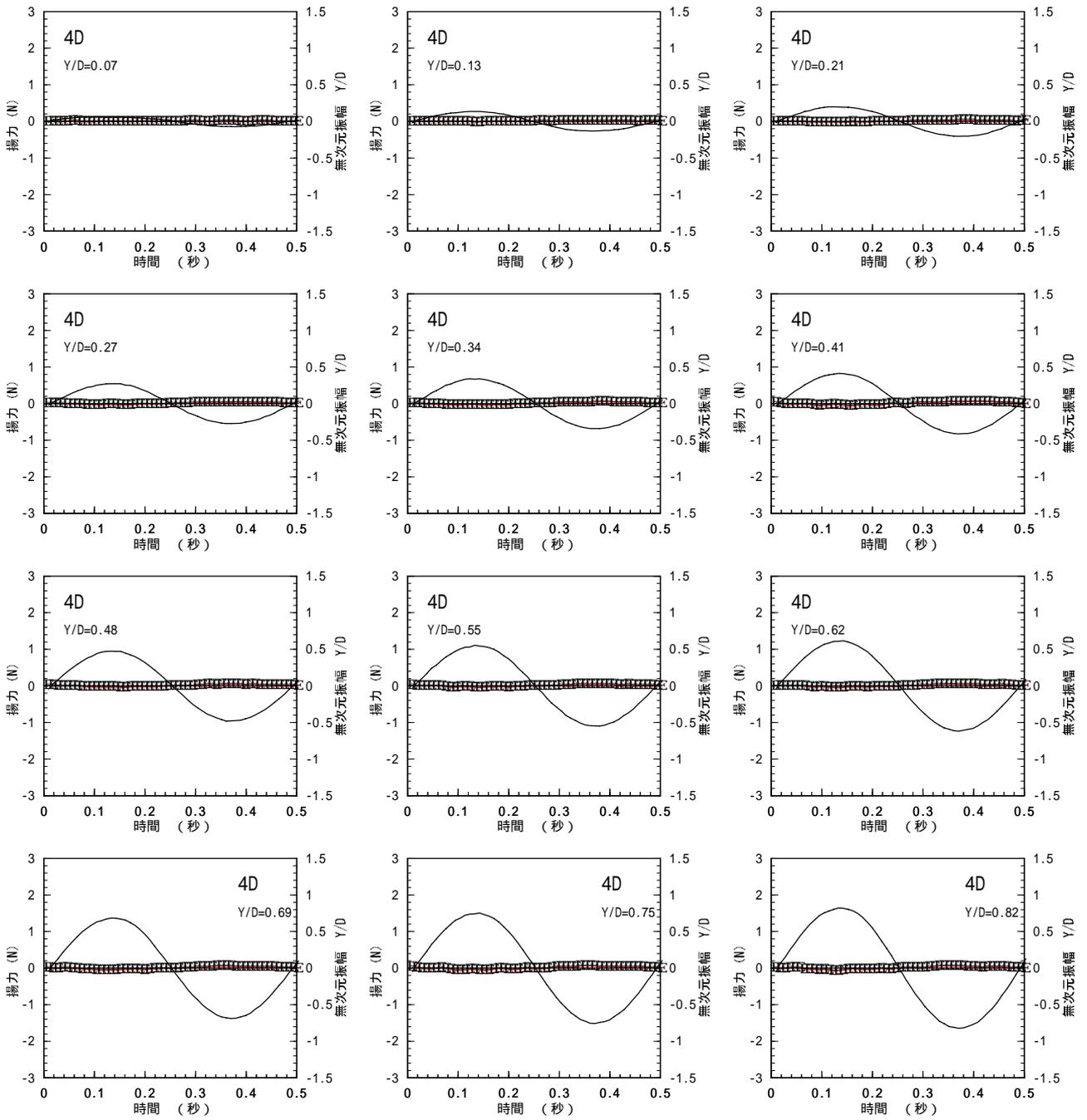
付図 4.2.6 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 3D 風速 (V) 12.3m/s



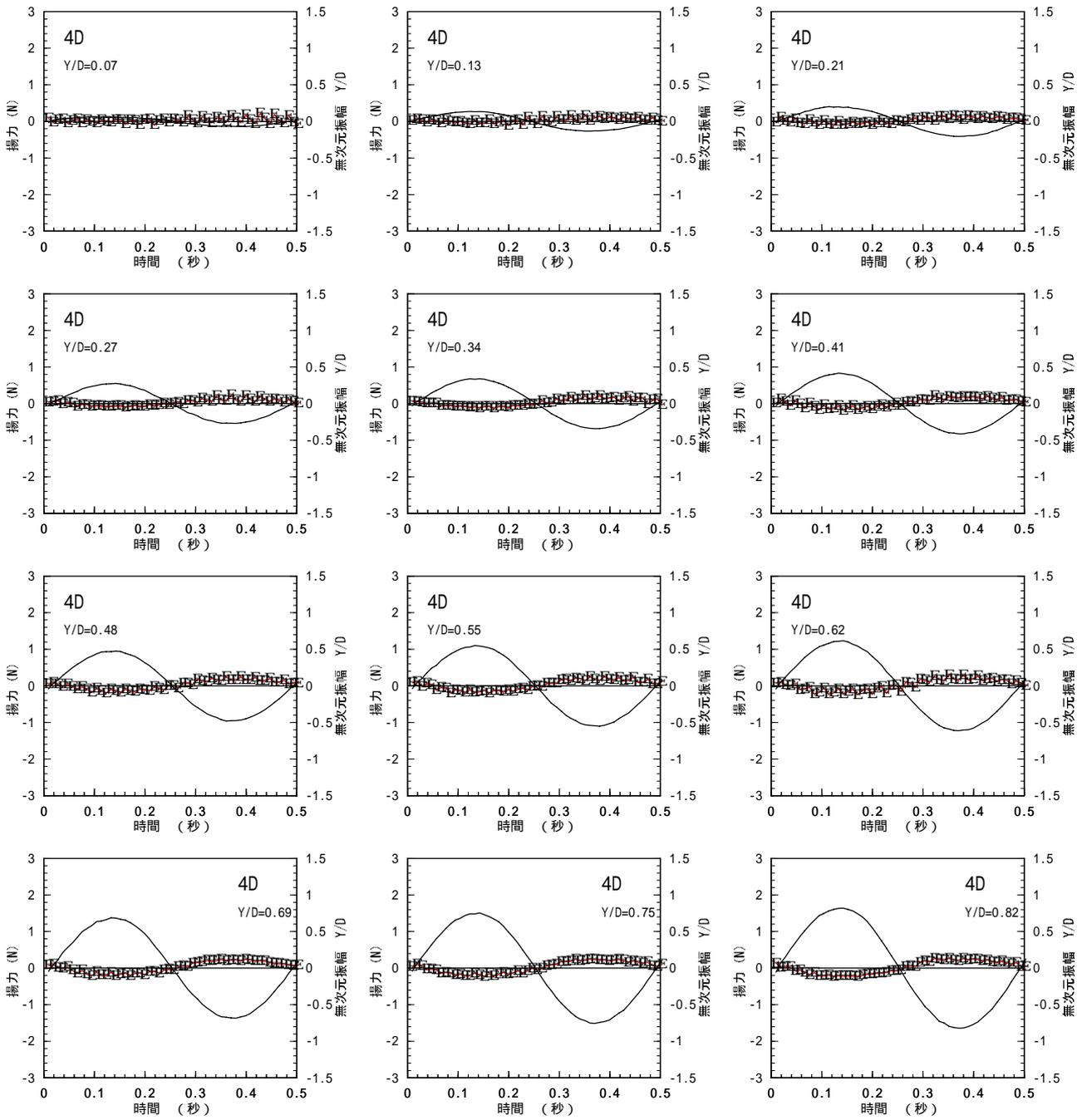
付図 4.3.1 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 4D 風速 (V) 2.9m/s



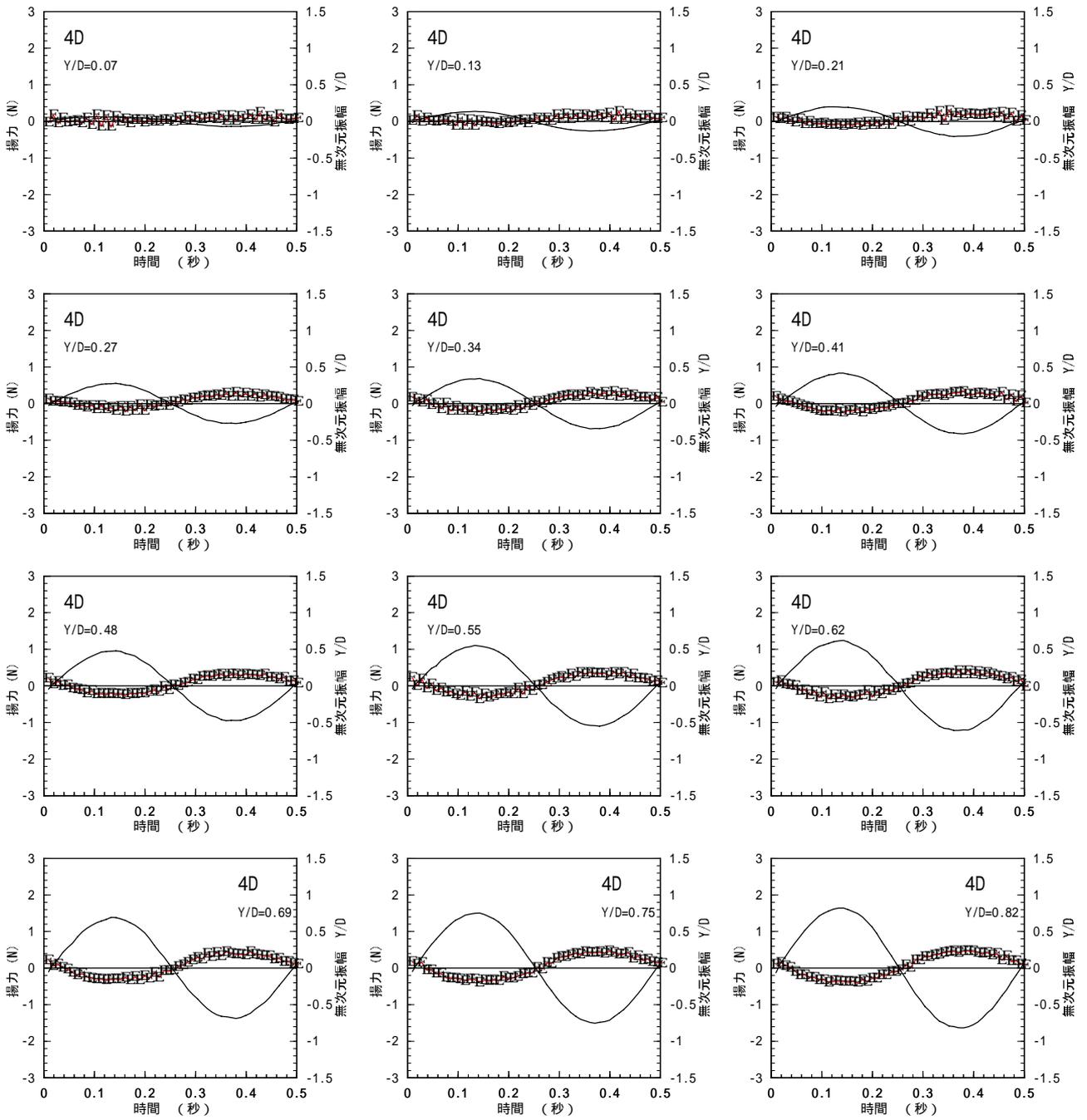
付図 4.3.2 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 4D 風速 (V) 4.0m/s



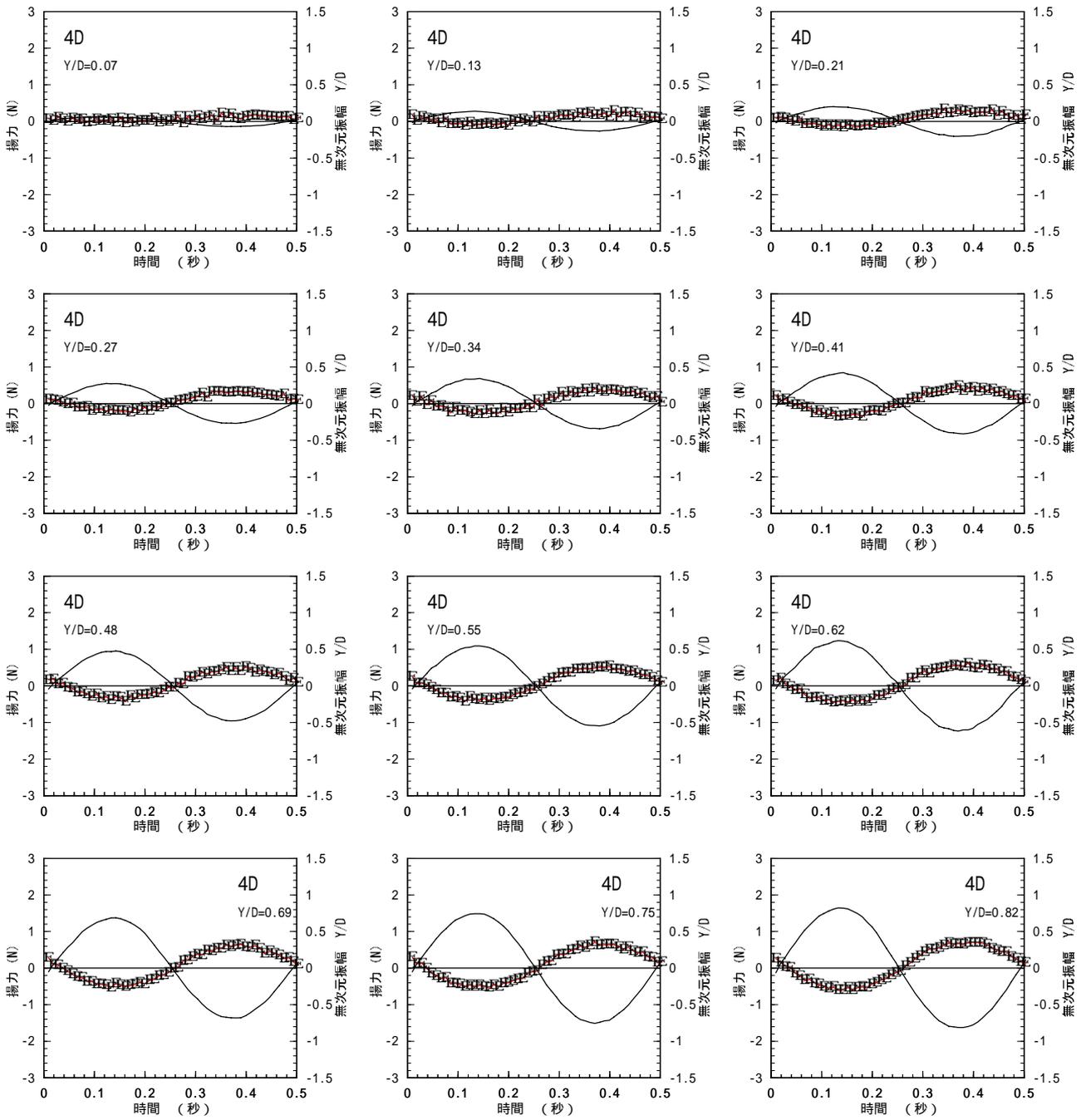
付図 4.3.3 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 4D 風速 (V) 6.2m/s



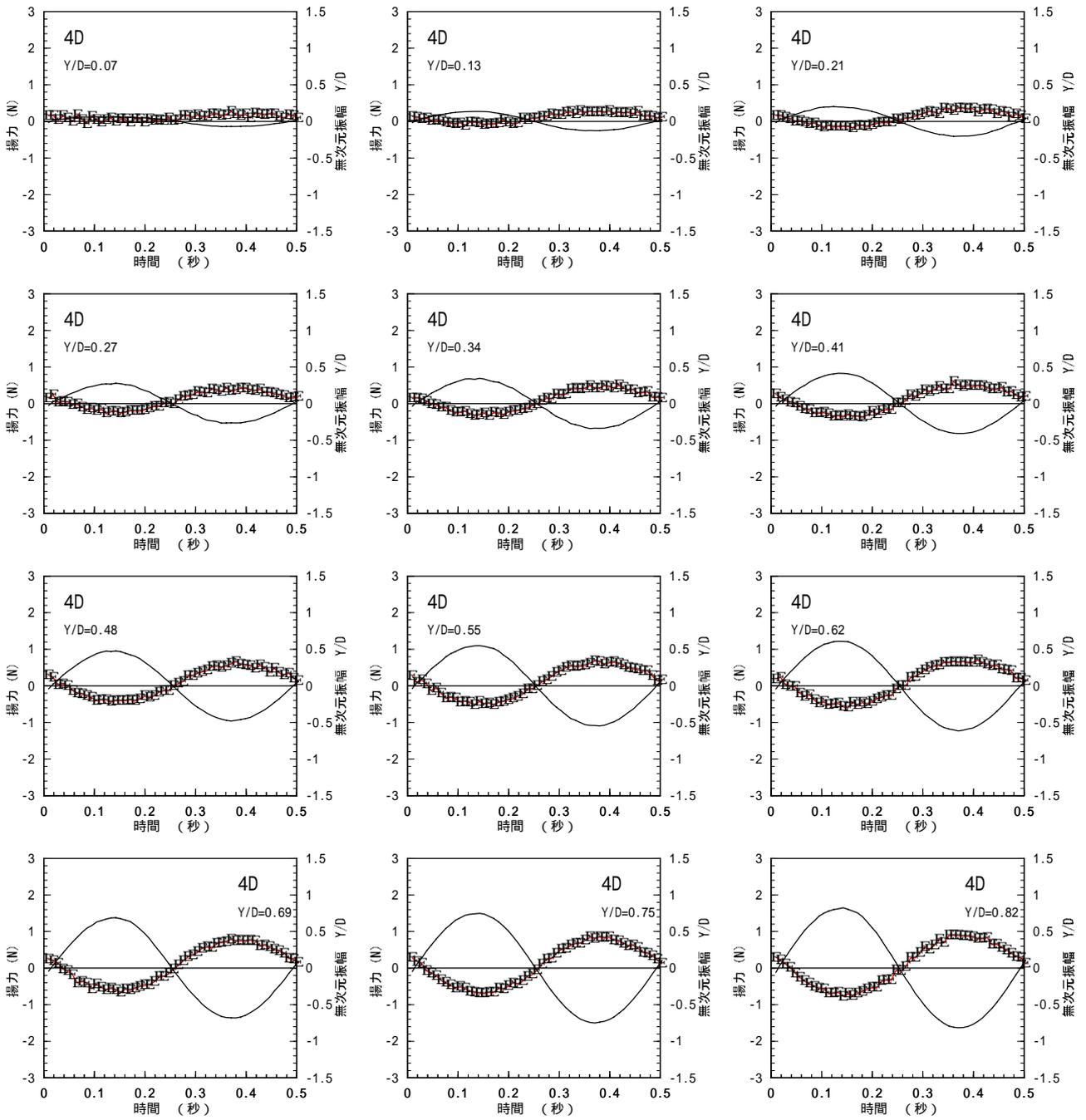
付図 4.3.4 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 4D 風速 (V) 8.4m/s



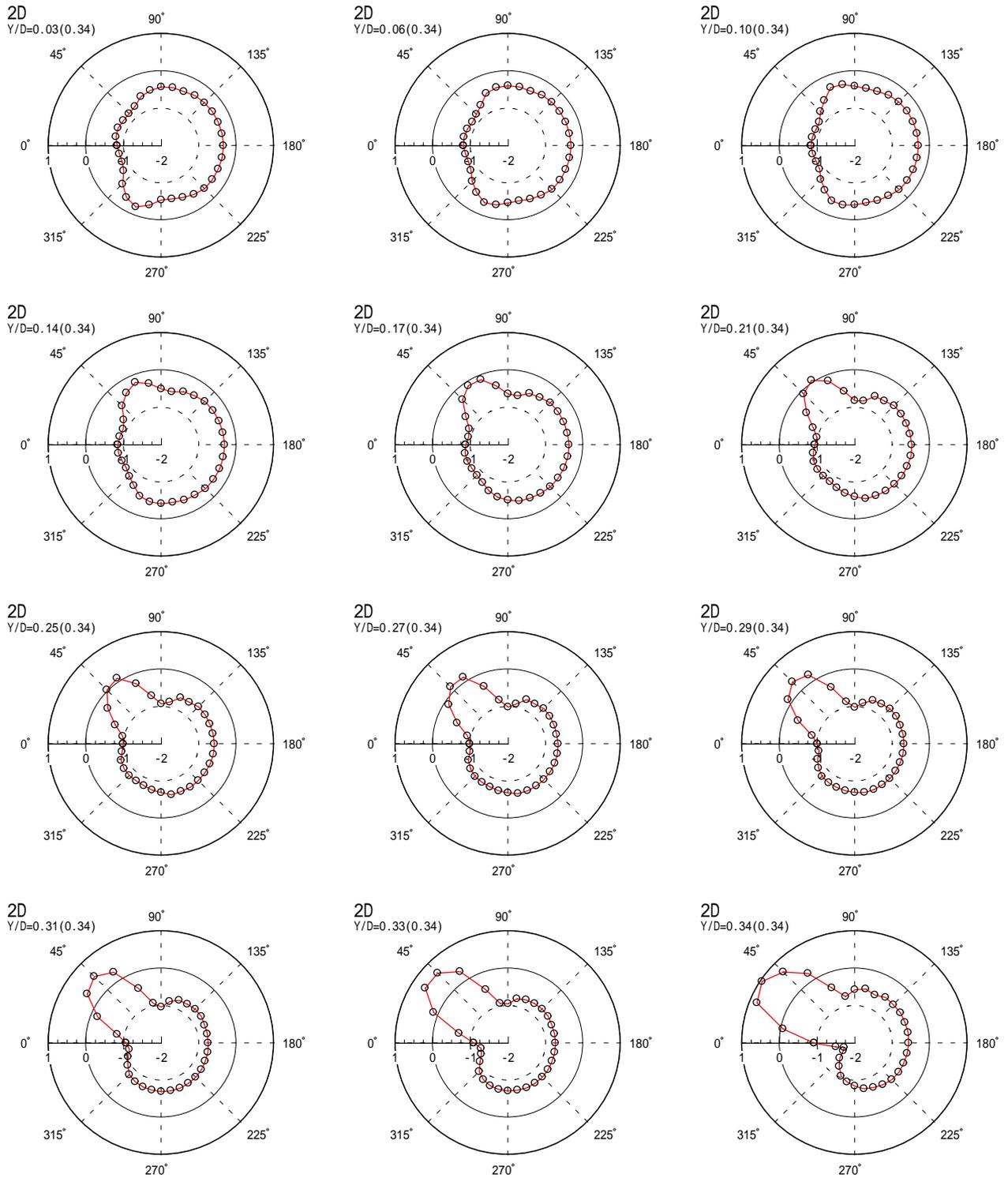
付図 4.3.5 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 4D 風速 (V) 10.7m/s



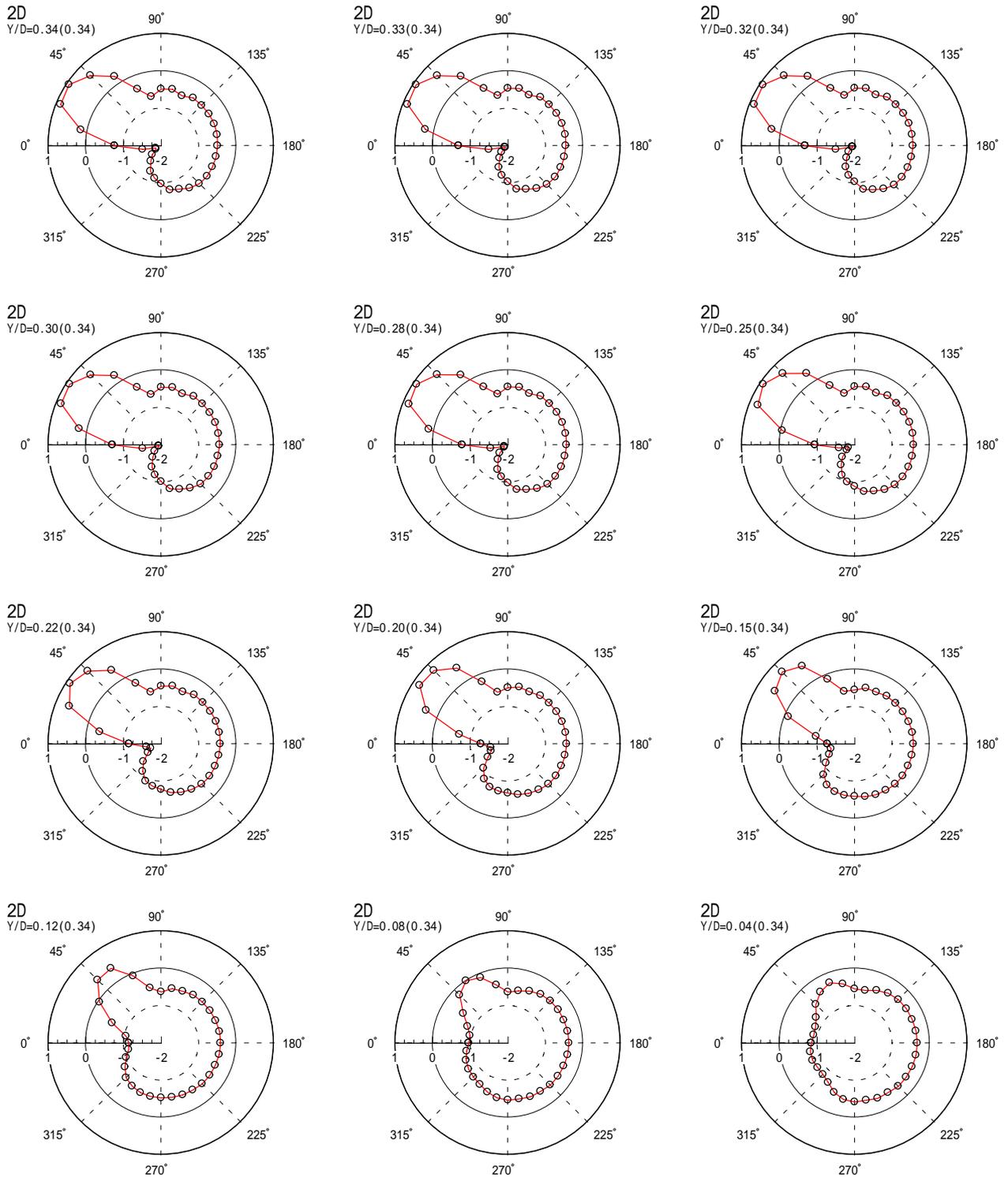
付図 4.3.6 非定常圧力測定 非定常揚力一周期平均

円柱間隔 4D 風速 (V) 12.3m/s



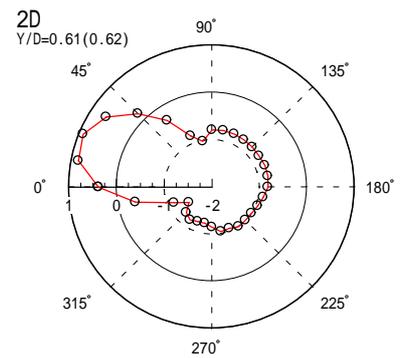
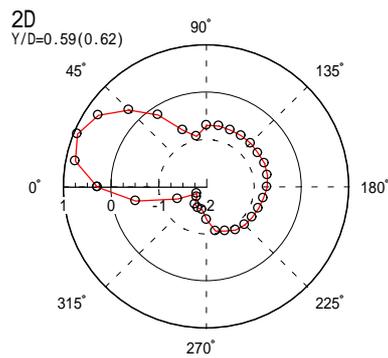
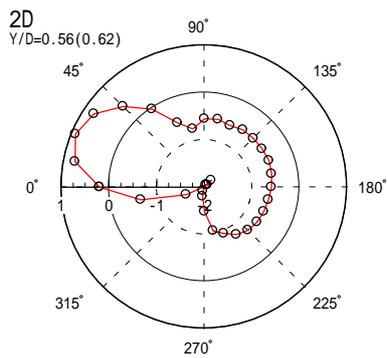
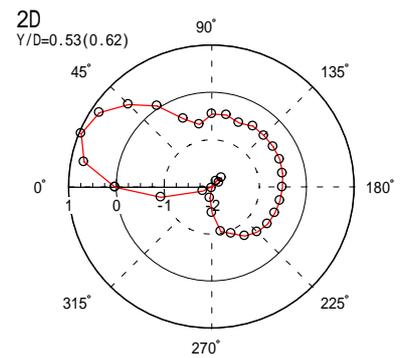
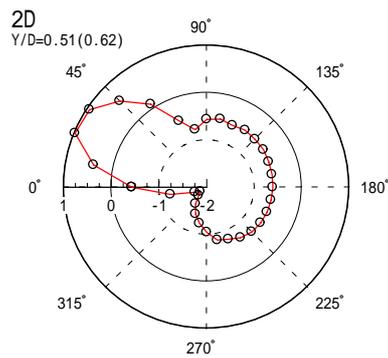
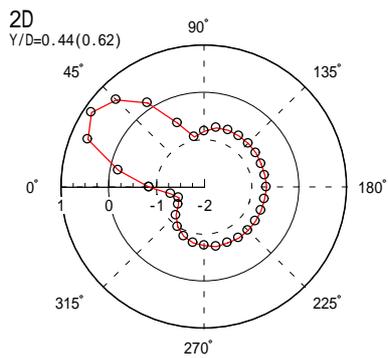
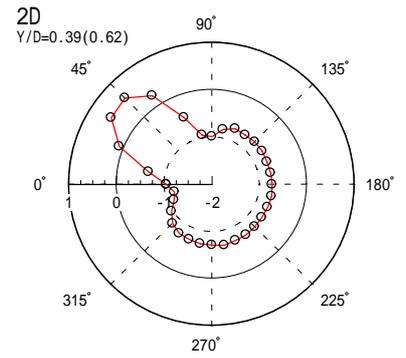
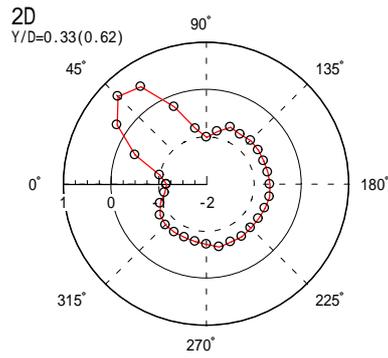
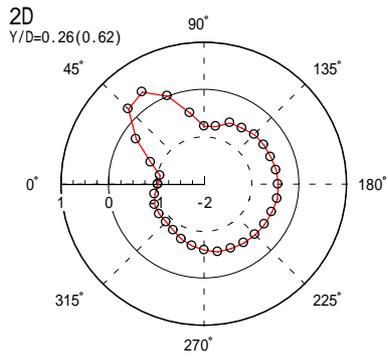
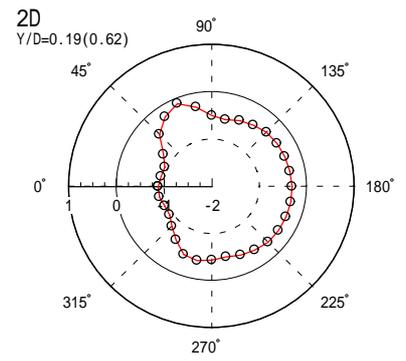
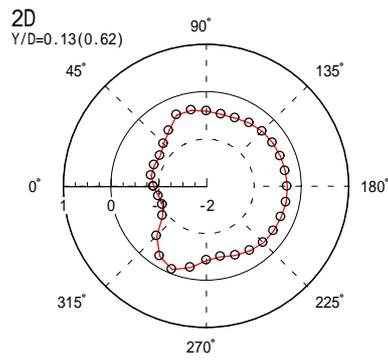
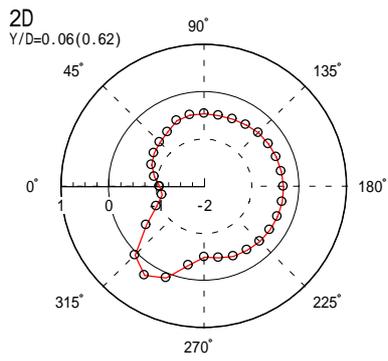
付図 5.1.1.1 非定常圧力測定 強制加振時の各変位における下流側円柱の表面圧力係数

円柱間隔 2D 風速 (V) 10.7m/s 加振振幅 (Y/D) 0.34 上昇中



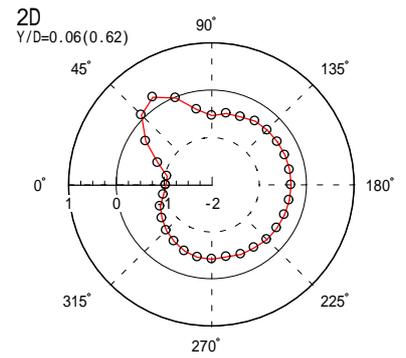
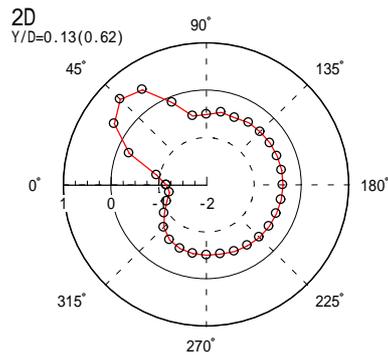
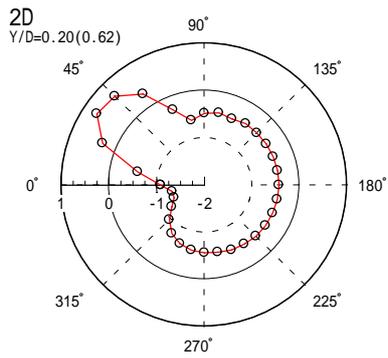
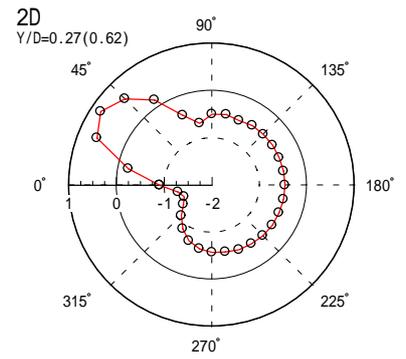
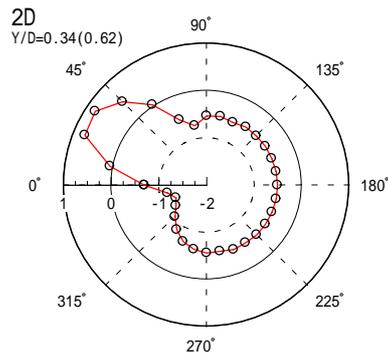
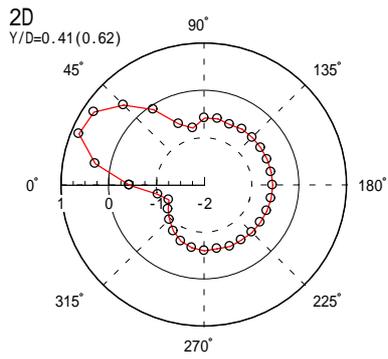
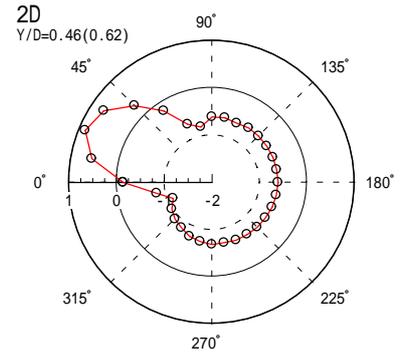
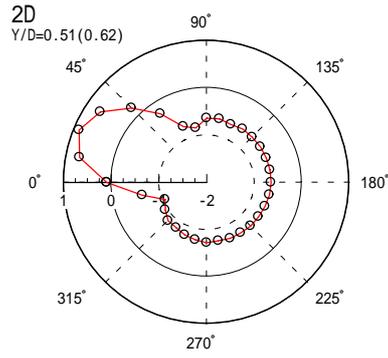
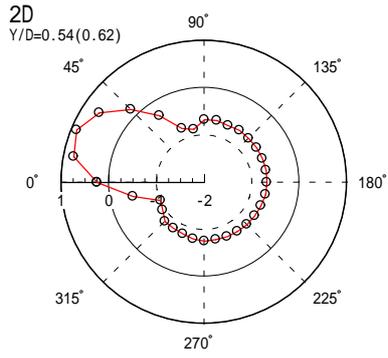
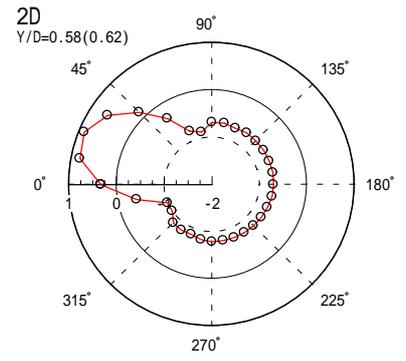
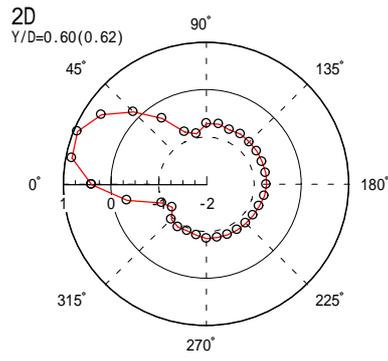
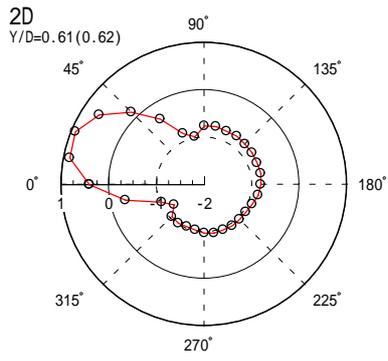
付図 5.1.1.2 非定常圧力測定 強制加振時の各変位における下流側円柱の表面圧力係数

円柱間隔 2D 風速 (V) 10.7m/s 加振振幅 (Y/D) 0.34 下降中



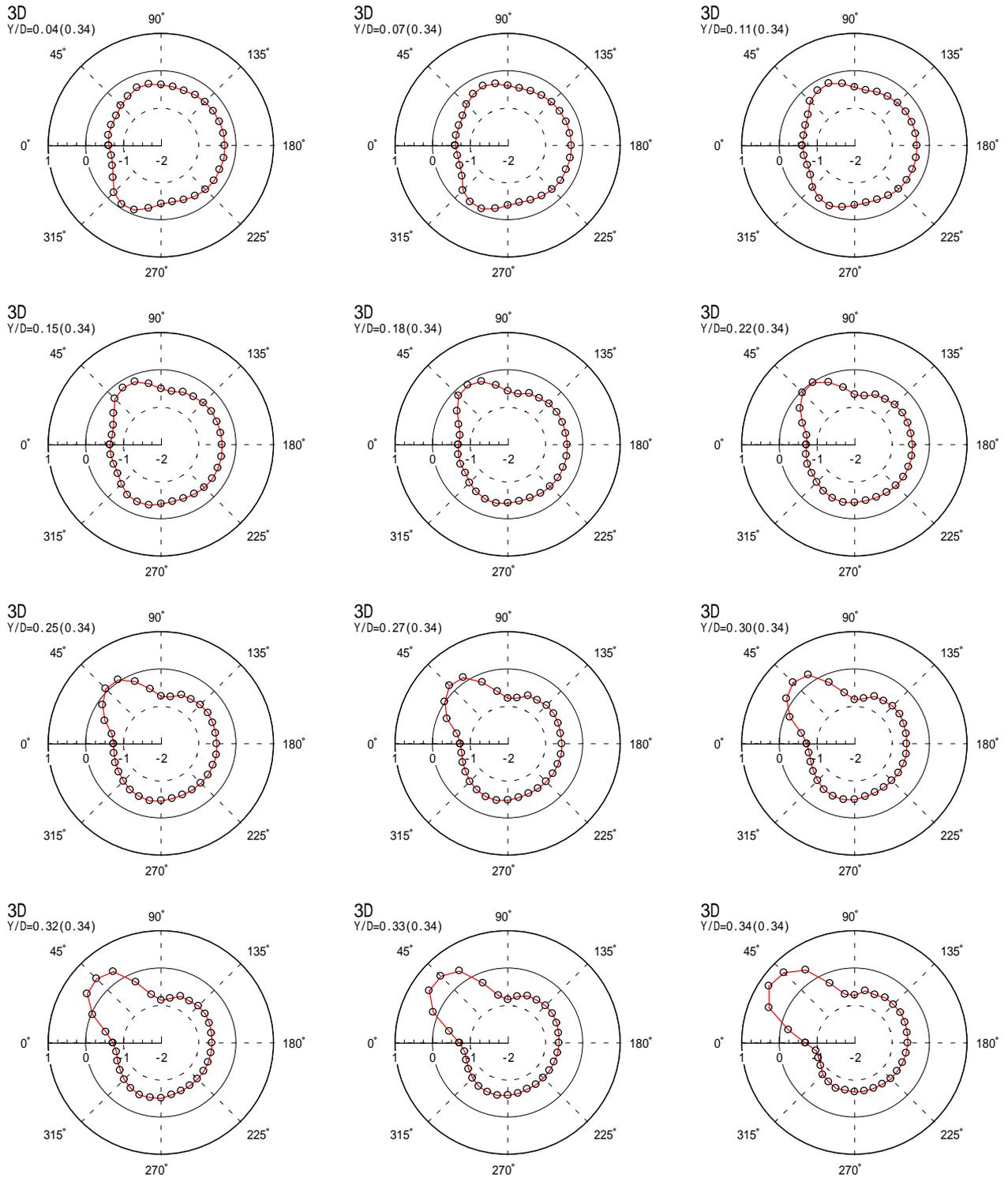
付図 5.1.2.1 非定常圧力測定 強制加振時の各変位における下流側円柱の表面圧力係数

円柱間隔 2D 風速 (V) 10.7m/s 加振振幅 (Y/D) 0.62 上昇中



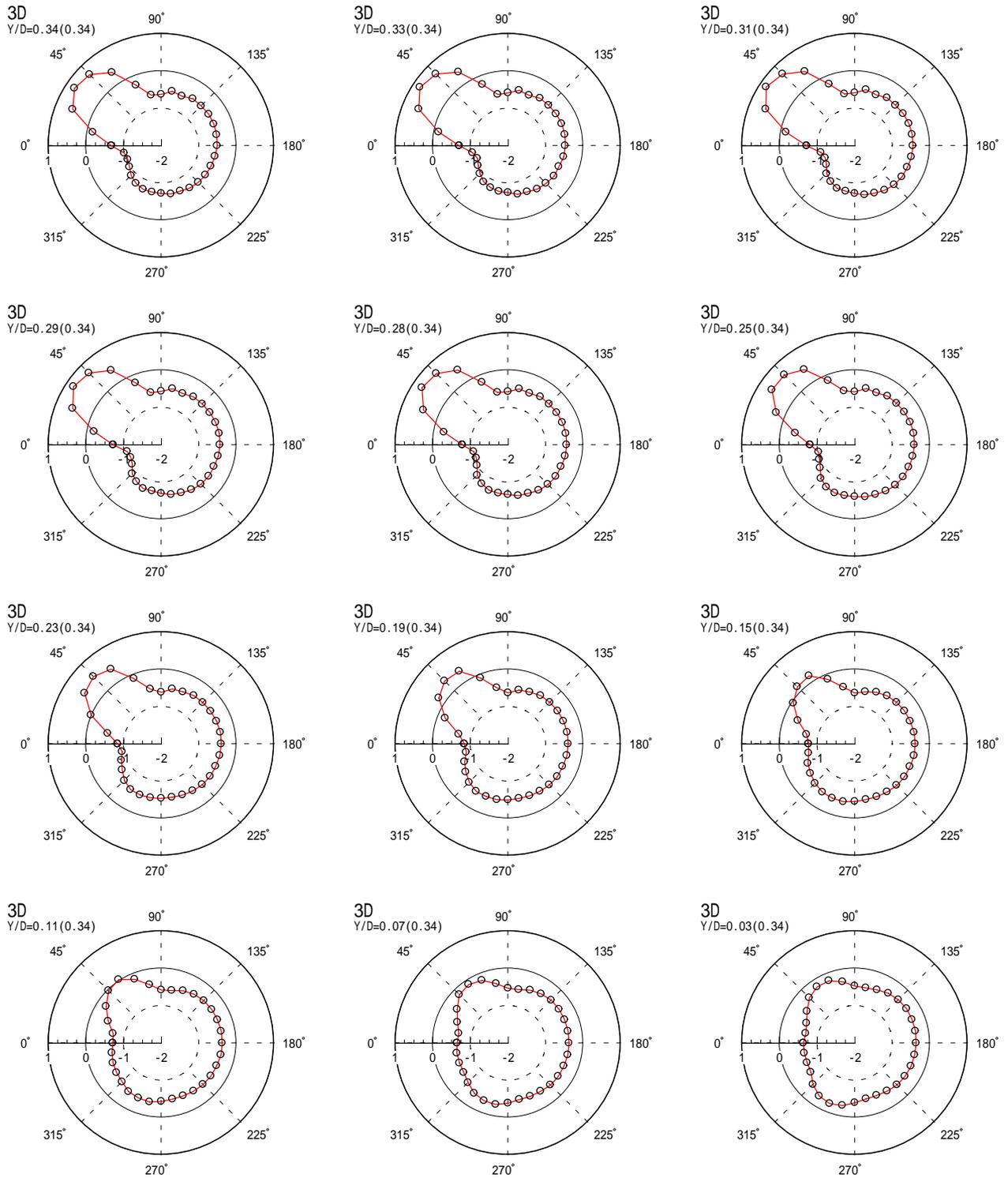
付図 5.1.2.2 非定常圧力測定 強制加振時の各変位における下流側円柱の表面圧力係数

円柱間隔 2D 風速 (V) 10.7m/s 加振振幅 (Y/D) 0.62 下降中



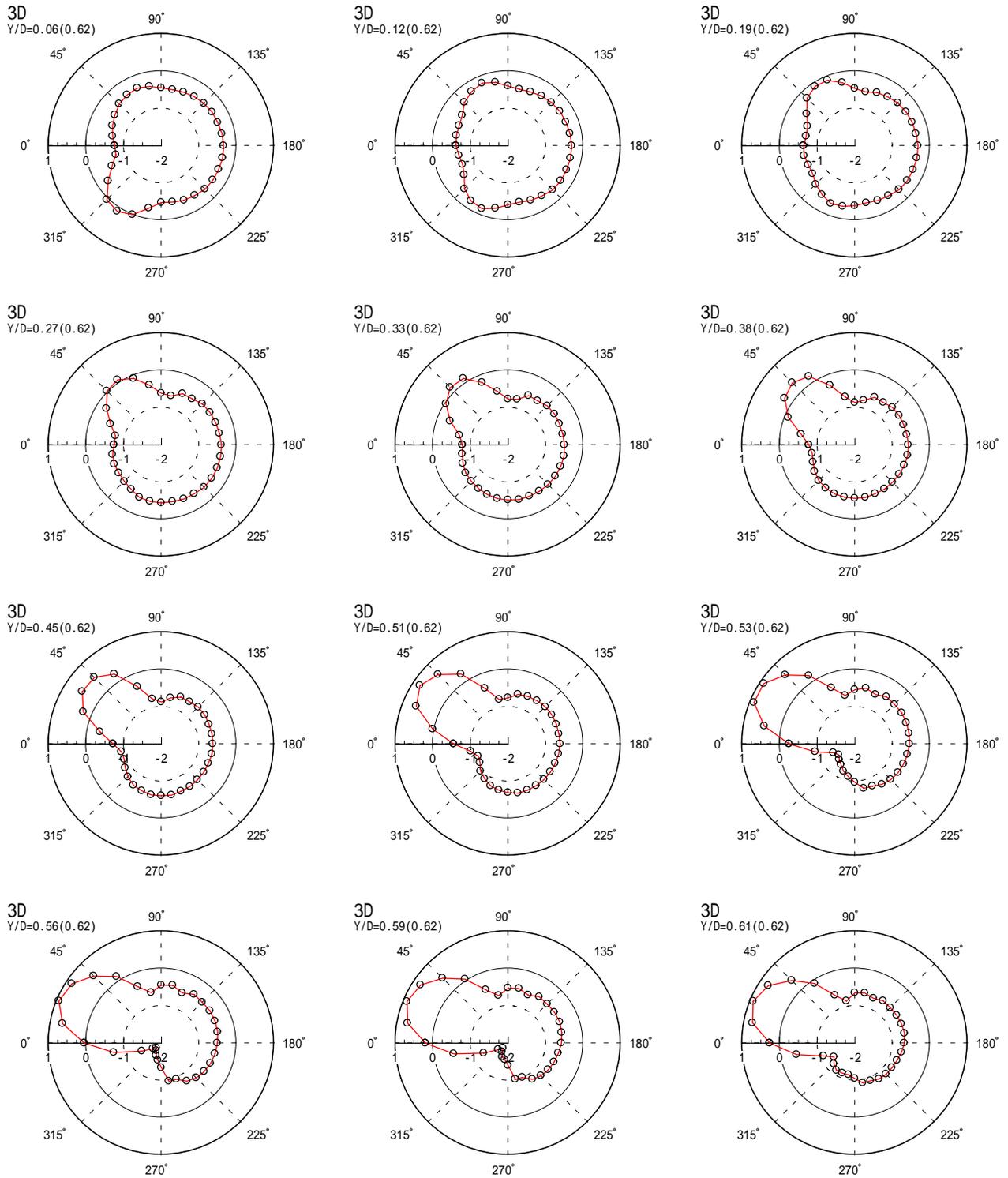
付図 5.2.1.1 非定常圧力測定 強制加振時の各変位における下流側円柱の表面圧力係数

円柱間隔 3D 風速 (V) 10.7m/s 加振振幅 (Y/D) 0.34 上昇中



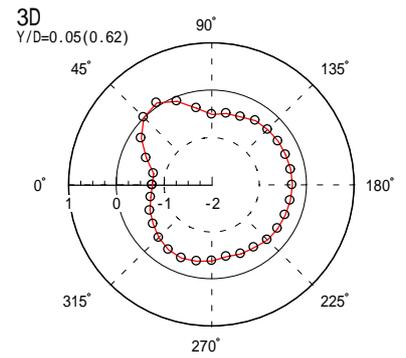
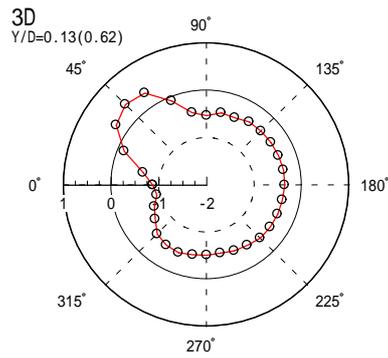
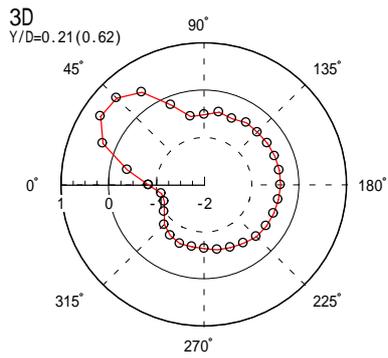
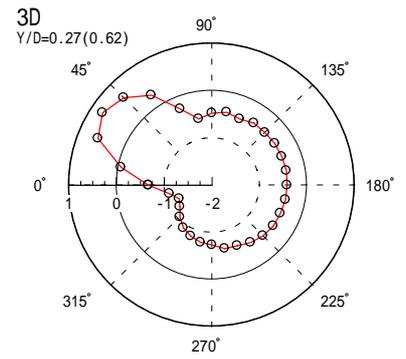
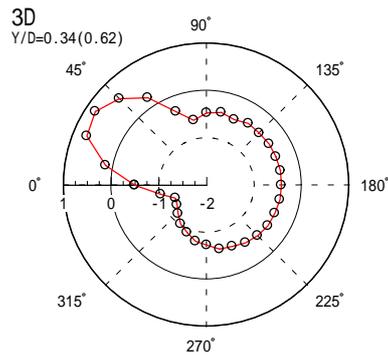
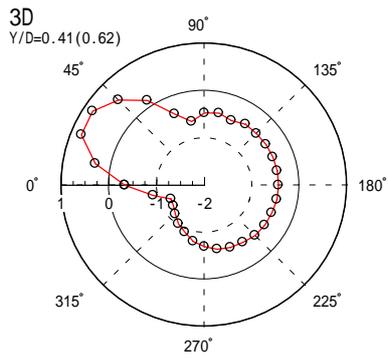
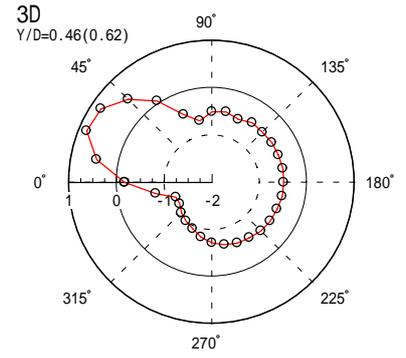
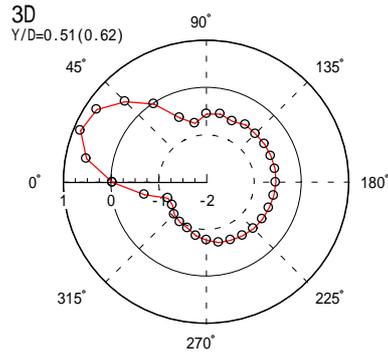
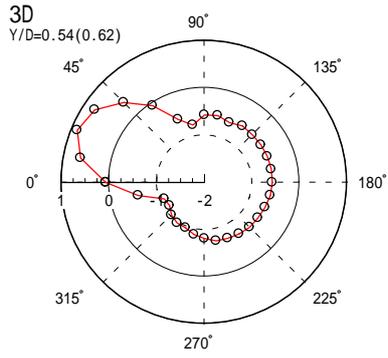
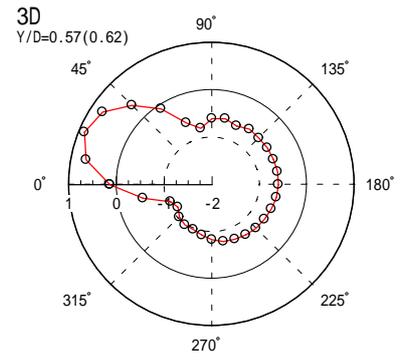
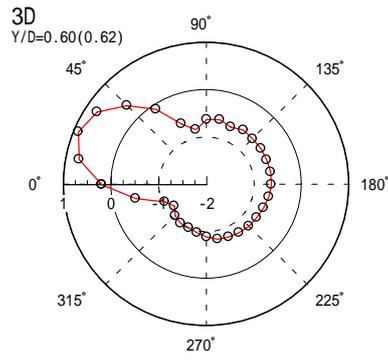
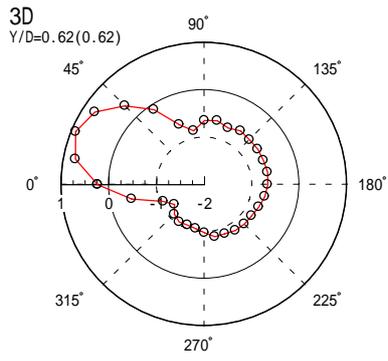
付図 5.2.1.2 非定常圧力測定 強制加振時の各変位における下流側円柱の表面圧力係数

円柱間隔 3D 風速 (V) 10.7m/s 加振振幅 (Y/D) 0.34 下降中



付図 5.2.2.1 非定常圧力測定 強制加振時の各変位における下流側円柱の表面圧力係数

円柱間隔 3D 風速 (V) 10.7m/s 加振振幅 (Y/D) 0.62 上昇中



付図 5.2.2.2 非定常圧力測定 強制加振時の各変位における下流側円柱の表面圧力係数

円柱間隔 3D 風速 (V) 10.7m/s 加振振幅 (Y/D) 0.62 下降中

参考文献

- 1) 建設省土木研究所ほか : 斜張橋並列ケーブル耐風制新に関する共同研究報告書
(その1)、平成5年3月
 同上 : 同上 (その2)、平成6年9月
 同上 : 同上 (その3)、平成7年3月

- 2) 藤澤伸光:「並列ケーブルのウェーク・ギャロッピングに関する - 実験」、第13回風工学シンポジウム論文集、1994

- 3) 八木悟:「ウェーク・ギャロッピングの応答特性に及ぼすケーブル間隔の影響」、土木学会四国支部、2002

謝辞

本研究にあたり、入学当初から、指導教員として終始御指導、御鞭撻していただいた藤澤伸光教授に深く感謝の意を表します。無事に本論分をまとめることができましたのも、藤澤教授の熱心な御指導の賜物と感じるばかりです。こうして授けてもらいました精神、能力、知識は決して忘れることなく、今後の学業に活かしていきたいと思います。

本研究は、私の知識が乏しく経験不足のため、多くの方々の御協力、御苦勞をいただきました。知能機械システム工学科の蝶野成臣教授には、流体力学の知識を授けてもらいました。同じく知能機械システム工学科の楠川量啓助教授には、実験器具製作に力を貸していただきました。突然の相談にも関わらず、快くお受けいただき熱心に御指導して下さったことには誠に感謝致しております。

また、社会システム工学コースの先輩にあたる小松茂久様が製作された実験設備のおかげで、本研究がスムーズにおこなえました。社会システム工学科の西森敬晃君には、解析プログラムの作成や実験の補助として協力してもらいました。同じく社会システム工学科藤澤研究室で共にがんばってきた遠藤芳洋君、佐々木浩司君、藤原幸さんには幾度となく励していただきました。皆様方の御協力なくしては、現在の私に至っていないものと深く感謝致しております。

指導教員の藤澤伸光教授を始め、諸先生方、皆様方、本当にありがとうございました。