

## 円柱の回転振動による渦放出のアクティブ制御に関する研究\*

### (ニューラルネットワークを用いた最適化)

藤 沢 延 行<sup>\*1</sup>, 中 林 貴 光<sup>\*2</sup>  
池 本 宏 一 郎<sup>\*3</sup>, 長 屋 幸 助<sup>\*4</sup>

## Active Control of Vortex Shedding from Circular Cylinder by Rotary Oscillations (Optimization with Neural Networks)

Nobuyuki FUJISAWA, Takamitsu NAKABAYASHI,  
Koichiro IKEMOTO and Kosuke NAGAYA

The active control of vortex shedding from a circular cylinder by rotary oscillations is studied experimentally using neural networks, which optimizes automatically the control parameters such as the phase lag and the feedback coefficient. This optimization procedure is applied to find out an optimum position of reference probe to attenuate the vortex shedding effectively. The attenuation effect of vortex shedding under this control is investigated by measuring the velocity fluctuations in the cylinder wake and the unsteady pressure distributions over the cylinder surface. It is found that the drag and lift forces acting on the cylinder are reduced under the optimum reference control in comparison with the control under other reference positions as well as those of the stationary cylinder.

**Key Words:** Flow Control, Flow Induced Vibration, Wake, Vortex, Rotary Oscillation, Neural Network

### 1. 緒 言

円柱下流に発生するカルマン渦列は、流体関連振動や騒音の発生原因となるため工学上重大な関心事であり、過去よりその制御に関する研究が活発に行われている。その制御法としては、円柱表面にワイヤやプレートなどの二次元突起やらせん状の三次元突起を取付け、円柱下流に発生するカルマン渦の三次元構造を崩壊するパッシブ制御<sup>(1), (2)</sup>がほとんどであり、それらはまた工業上広く応用されている。一方、最近になって、より大きな制御効果と適用条件の拡大を意図したフィードバック制御に関する研究が注目されている。この種の制御では、円柱後流で検出した渦放出周波数を含む速度信号を制御信号として用い、その制御手段としては、音<sup>(3), (4)</sup>、円柱の流れに対する垂直方向振動<sup>(5), (6)</sup>、円柱の回転振動<sup>(7)</sup>が提案されている。最近、このようなフィードバック制御の制御機構について、流れの可

視化と円柱表面の圧力分布測定から検討<sup>(8), (9)</sup>が行われ、徐々にその制御の有効性が検証されつつある。一方、これらのフィードバック制御においては、制御信号の参照信号に対する位相遅れと信号の増幅率を示すフィードバック係数の選定が最重要課題であり、効率良く渦制御を行うには、これらのパラメータの最適化について検討する必要がある。しかしながら、これらの最適値は、同時に制御対象、参照信号の検出位置、流れ条件などの実験条件にも依存することが予期されるため、これらを実験条件ごとにパラメータの最適化実験から求めることは極めて困難である。したがって、このアクティブ制御の実用化上、制御パラメータの自動最適化法について検討することは有要である。

本研究では、円柱の回転振動による渦放出のアクティブ制御法に階層型ニューラルネットワークを適用して、制御パラメータの最適化法を検討する。さらに、最大制御効果を得る参照信号の検出位置についての考察、ならびに、円柱表面圧力分布測定から流体特性の評価を行い、制御効果の有効性を検証した結果を報告する。

\* 原稿受付 1997年8月8日。

<sup>\*1</sup> 正員, 新潟大学工学部(☎950-2181 新潟市二の町8050)。

<sup>\*2</sup> 群馬大学大学院(☎376-8515 桐生市天神町1-5-1)。

<sup>\*3</sup> 学生員, 群馬大学大学院。

<sup>\*4</sup> 正員, 群馬大学工学部。

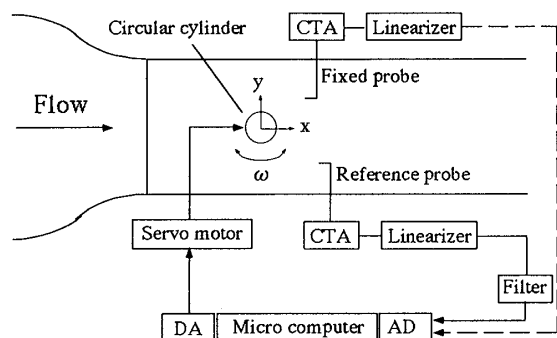


Fig.1 Experimental test section and active control loop

## 2. 実験装置および方法

**2.1 実験装置の概要** 図1に本研究に使用した実験装置測定部の概略とアクティブ制御システムを示す。供試円柱は、既報<sup>(7)</sup>と同じく半径50mm、長さ498mmであり、それは風洞測定部(断面寸法500mm×500mm)の両側壁にベアリングで支持し、一端に固定したACサーボモータで回転振動させる構造である。アクティブ制御の参照信号としては、円柱下流の任意の位置に固定した熱線流速計のI型プローブから得られる速度変動を用いた。この参照信号は、リニアライザを通して線形化した後ローパスフィルタ(カットオフ周波数2.2Hz)とハイパスフィルタ(カットオフ周波数1.6Hz)によって信号の直流成分と高周波成分を除去し、カルマン渦の基本調波成分を持つ制御信号が取り出される。さらに、それをA-D変換しコンピュータ内で任意の位相遅れ $\phi$ とフィードバック係数 $\alpha$ を設定した後D-A変換し、ACサーボモータに入力すると、円柱は入力電圧に比例した角速度で制御された回転振動運動をする。ただし、位相遅れ $\phi$ は、参照信号に対する円柱回転の角速度信号の遅れを静止円柱の渦放出の1周期を $360^\circ$ として表した角度であり、フィードバック係数 $\alpha (=R \delta \omega / \delta u_r)$ は、参照プローブ位置での速度変化量 $\delta u_r$ に対する円柱表面の速度変化量 $R \delta \omega$ である。ただし、 $\omega$ は角速度である。実験は、種々の参照プローブ位置における渦制御効果のある特定の位置で調べるため、固定プローブ位置( $x/R=3, y/R=1.6$ )における速度変動の測定を行った( $R$ :円柱半径、 $x$ :円柱中心からの主流方向距離、 $y$ :主流に垂直方向距離)。また、円柱に加わる流体力特性に及ぼす制御効果の評価するため、円柱表面の圧力分布を測定した。その

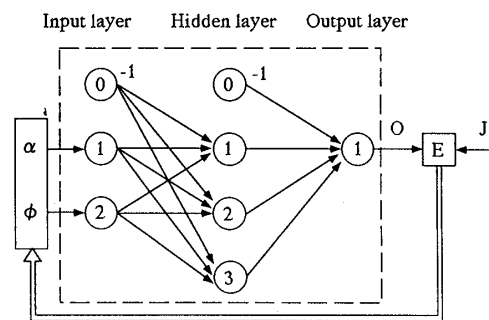


Fig.2 Neural network

実験装置は、既報<sup>(9)</sup>と同様であり、円柱の幅方向中央に設けた直径1mmの圧力孔で取り出し、円柱外部に取付けたひずみゲージ式圧力変換器で検出する。実験は、圧力信号のサンプリングと同時に、参照速度信号、サーボモータの角速度信号、そしてフォトセンサで検出した円柱の回転角度信号をA-D変換後コンピュータ内に取り込み、さらに解析することで放出渦の位相ごとの平均圧力分布を求める。さらに、その圧力分布を周方向に積分し、位相平均抗力、揚力を算出した。ただし、固定プローブにおける渦制御効果の測定は主流速度 $U=1\text{m/s}$ で行ったが、圧力測定は測定精度の都合から $U=3\text{m/s}$ で行った<sup>(9)</sup>。

**2.2 ニューラルネットワークの構成** 図2に本実験で用いたニューラルネットワークの構成を示す。それは、3層の誤差逆伝ぱ形で、入力層ユニット数2、中間層ユニット数3、出力層ユニット数1からできており、さらに入出力層にはそれぞれ-1を出力する閾値ユニットが加わった構成である。これは、基本的には、動吸振器の最適制御に用いられたネットワーク構成<sup>(10)</sup>と同じである。ただし、本実験では、位相遅れ $\phi$ とフィードバック係数 $\alpha$ が入力層の入力パラメータとなる。この誤差逆伝ぱ形ニューラルネットワークの特徴は、出力目標関数 $O$ と評価関数 $J$ の二乗誤差で定義される誤差評価関数 $E = (J - O)^2 / 2$ を最小化するため各ユニット間の結合荷重の修正と同時に入力関数である位相遅れ $\phi$ とフィードバック係数 $\alpha$ も修正する点である。この特長は、本研究の円柱後流のように、制御対象に非定常性が予期される場合に有効性を持つ。すなわち、結合荷重および入力関数は、最急降下法<sup>(10)</sup>に基づいて修正を施した(付録参照)。また、評価関数 $J$ としては、参照プローブから得られる速度変動 $u_r'$ を抑制するため、 $J = \int_0^T u_r'^2 dt$ を用い、これをニューラルネットワークで最小化することになる。ただし、 $t$ は時間、 $T$ は積分時間である。 $T$ の設定値は、一般的には1周期が採られ

るが、本研究で得られる速度変動波形には強い非定常性が含まれているため、10周期以下の積分時間では制御系の収束は見られなかった。しかしながら、 $T$ の値を過大に採ることは、ニューラルネットワークの学習時間を増大させ、現象に対する制御系の追従性を低下させることになる。したがって、本研究では、時間積分を約7周期ごとに求め、連続した5個の時間積分値の算術平均を評価関数として用いた。このことにより、評価関数の時間的変動が抑制され、同時に現象に対する追従性も良好に保つことが可能であった。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 種々の参照プローブ位置における制御効果

本アクティブ制御の制御信号を取り出す参照プローブの位置を円柱後流内で種々変えた場合の後流応答の測定結果を図3に示す。ただし、図3(a)は $\alpha=0.48$ において制御した場合の固定プローブ位置 ( $x/R=3, y/R=1.6$ ) における速度変動  $\sqrt{u_1^2}/U$  と位相遅れ $\phi$ の関係であり、図3(b)は図3(a)から求まる速度変動が最小となる位相に固定して  $\sqrt{u_1^2}/U$  とフィードバック係数 $\alpha$ の関係を求めた結果である。いずれも3種の参照プローブ位置 ( $x/R=3, y/R=-1.6$ )、( $x/R=4, y/R=-2.4$ )、( $x/R=3, y/R=0$ ) における結果を示す。ここに、参照プローブ位置 ( $x/R=3, y/R=-1.6$ ) は、既報<sup>(7)</sup>のアクティブ制御実験でのプローブ位置と同一位置である。これらの図から、位相遅れ $\phi$ とフィードバック係数 $\alpha$

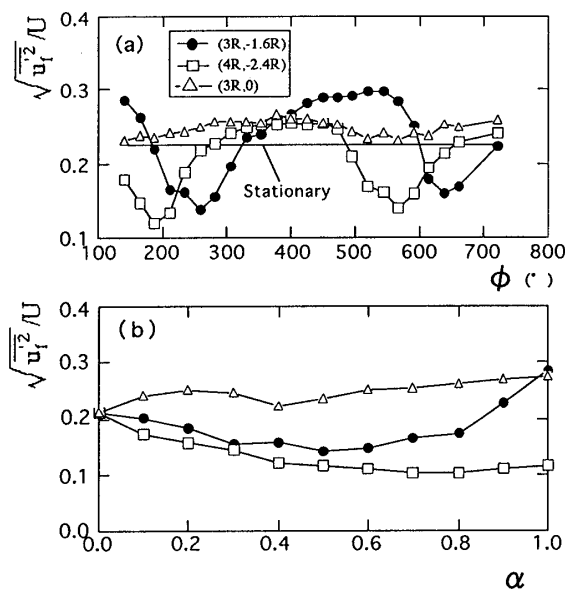


Fig.3 Effect of control parameters on velocity fluctuations at fixed probe  $\sqrt{u_1^2}/U$   
(a) Phase lag  $\phi$ , (b) Feedback coefficient  $\alpha$

の変化に伴って、固定プローブ位置の速度変動の大きさは変化し、無制御状態に対応する静止円柱の場合と比べ速度変動が減少する位相遅れ $\phi$ とフィードバック係数 $\alpha$ の組合せが存在することがわかる。ただし、速度変動の減少効果は、参照プローブ位置にも強く依存しており、これらの3種のプローブ位置では ( $x/R=4, y/R=-2.4$ ) において最も強い制御効果が見られる。このことは、参照プローブ位置を最適化させることによって、既報<sup>(7)</sup>の制御効果より大きなアクティブ制御効果が得られることを示す。一方、本実験の範囲では、位相遅れ、フィードバック係数のいずれにおいても速度変動の極小値が最小値をとることは明らかであり、ニューラルネットワークにおいてしばしば問題となるローカルミニマムの問題は発生しにくいと思える。ただし、位相遅れに対しては1周期遅れの位相遅れにおいても極小値を示すが、一般にそれは最適位相での速度変動値よりわずかに大きく、また、初期値の設定で十分回避できる。ただし、参照プローブ位置 ( $x=3R, y=0$ ) における結果は、位相遅れ $\phi$ 、フィードバック係数 $\alpha$ のいずれの変化に対しても、速度変動の制御応答は微弱であ

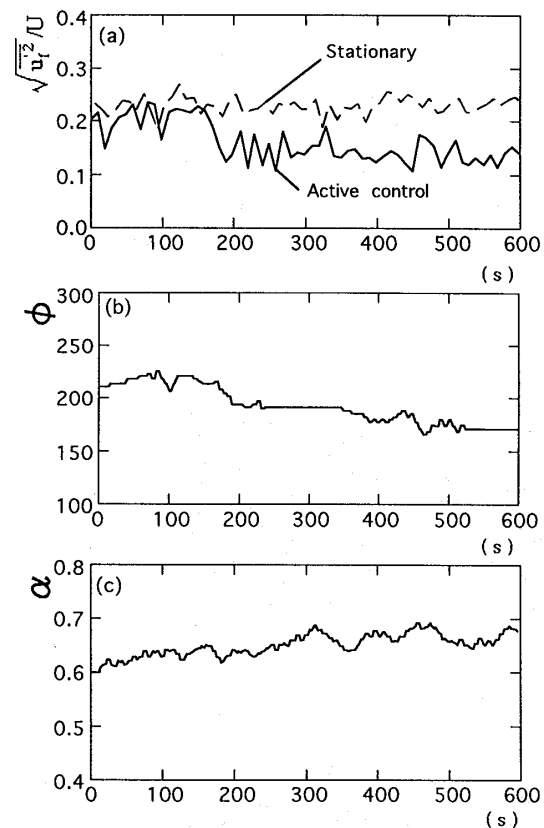


Fig.4 Time variations of reference velocity fluctuations and control parameters under active control with neural network  
(a) Velocity fluctuations  $\sqrt{u_1^2}/U$ , (b) Phase lag  $\phi$ , (c) Feedback coefficient  $\alpha$

り、ニューラルネットワークによる最適パラメータの探索が困難であることが予期される。また、図は省略するが、参照プローブ位置の速度変動の測定結果は、ここに示した固定プローブ位置の測定結果とほぼ同様な変化を示した。

### 3.2 ニューラルネットワークによる最適化

ニューラルネットワークによる最適パラメータ探索をアクティブ制御に併用した場合の制御過程の一例として、参照プローブ位置が  $(x/R=4, y/R=-2.4)$  の場合の結果を図4に示す。ここでは、固定プローブにおける速度変動  $\sqrt{u_1^2}u$  (a)、位相遅れ  $\phi$  (b)、フィードバック係数  $\alpha$  (c) の時間変化をニューラルネットワーク制御開始後の経過時間  $t$  に対してプロットした結果である。制御開始後150秒付近までは、ニューラルネットワーク制御と静止円柱の速度変動の大きさはほぼ同程度であるが、さらに経過時間が増大すると速度変動の減少効果が顕著に見られ、 $t=400$ 秒以降ではほぼ定常な減少効果を与えることがわかる。このような速度変動の減少効果に対応して、位相遅れは減少し、フィードバック係数は反対に増大し、それらの最適値に接近する。ただし、それらの変化過程は単調ではなく、ゆるやかに増大減少を繰り返しながら徐々に定常値に近づく様子が見られ、円柱後流の非定常性を示唆する。また、ニューラルネットワークの収束性は、位相遅れ  $\phi$  とフィードバック係数  $\alpha$  の初期値の選定および参照プローブ位置にも依存するが、予期されるように、初期値が最適値に近いほど、図3のパラメータ  $\phi$ 、 $\alpha$  による速度変動値の変化が大きいほど、良好な収束性が得られるようである。

図5は、ニューラルネットワークによる最適パラメータ探索を種々の参照プローブ位置で行った結果である。ここでは、固定プローブ位置の最適速度変動値  $\sqrt{u_1^2}u$  (a)、そのときの最適位相遅れ  $\phi_0$  (b) と最適フィードバック係数  $\alpha_0$  (c) の値の変化を参照プローブの設置位置に対して示した結果である。なお、本結果は、図中の領域内で35箇所参照プローブ位置を移動し、各々の位置での最適値を求め、それらに補間近似を施し等高線表示した結果である。図5(a)の最適速度変動値の分布によると、固定プローブの速度変動を最小とする参照プローブ位置は  $(x/R=4, y/R=-2.4)$  付近に存在すること、ならびに、速度変動を小さく抑える参照プローブ位置は円柱から下流外側寄りの広がりを見ることがわかる。一方、円柱背後の領域では、ニューラルネットワークによる最適パラメータの探索が困難であったため、その領域は図に斜線で示した。この領域で

は、図3に示したように、速度変動値が位相遅れとフィードバック係数のいずれにもわずかしか変化せず、それと比べ現象の非定常性の方が強く働くため、ニューラルネットワークによる最適化が困難であったと考えられる。ただし、この領域では図3の結果からも予期されるように、速度変動値に対する制御効果はほとんど期待できない。一方、図5(b)、(c)によると、最適参照プローブ位置  $(x/R=4, y/R=-2.4)$  付近における位相遅れとフィードバック係数は  $\phi_0=190^\circ$ 、 $\alpha_0=0.7$  付近に存在することがわかる。ただし、最適位相遅れは参照プローブが下流に移動するほど小さく、最適フィードバック係数は速度変動の減少する円柱外側に移動するほど大きくなる傾向にある。

3.3 周波数分析 図6は、アクティブ制御による速度変動の減少効果が顕著に現われる最適参照プローブ

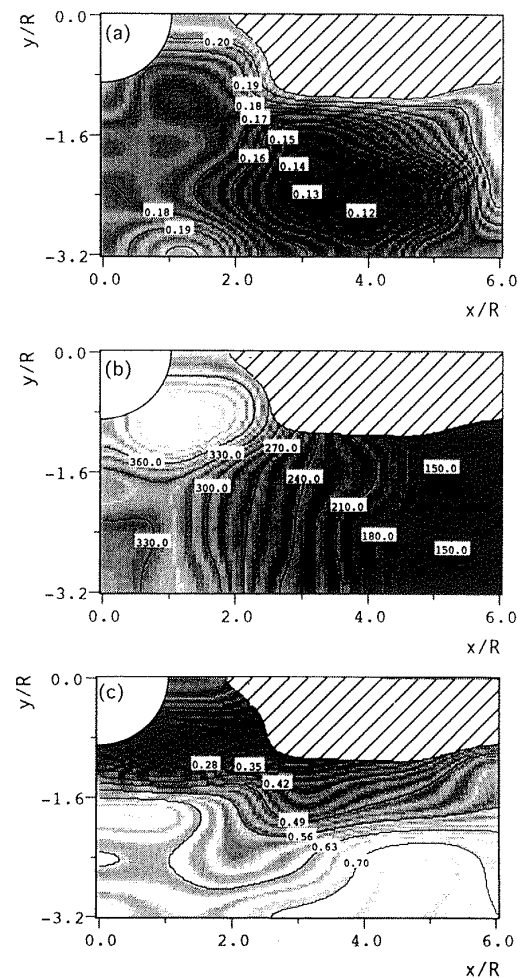


Fig.5 Distributions of optimum velocity fluctuations at fixed probe and optimum control parameters obtained from active control with neural network  
(a) Velocity fluctuations  $\sqrt{u_1^2}u$ , (b) Phase lag  $\phi_0$ ,  
(c) Feedback coefficient  $\alpha_0$ .

ブ位置 ( $x/R=4, y/R=-2.4$ ) と制御効果があまり認められない円柱背後の参照プローブ位置 ( $x/R=3, y/R=0$ ) における参照速度信号の周波数分析結果を示す。ただし、図の縦軸は、 $u_r^2 = \int_0^\infty P_u dt$  で定義されるパワースペクトル関数  $P_u$  であり、横軸  $f$  は周波数 (Hz) である。なお、本結果はフィルタ処理を施す前の参照速度信号に対する結果である。最適参照プローブ位置の周波数分析結果によると、制御の有無に拘らずカルマン渦の基本周波数にピークを持つスペクトル分布が得られているが、円柱背後に参照プローブを位置した場合には、同様の基本周波数のピークより大きなピークが二倍周波数に見られる。したがって、円柱背後に参照プローブを位置した場合には、制御の結果得られる円柱の回転振動にこのような高次の周波数も含まれることになり、既報<sup>(9)</sup>の流れの可視化実験で示したような、渦放出に伴う円柱の回転運動による動的制御が正確に行えないことになる。すなわち、参照プローブ位置による制御効果の違いは、参照速度信号の波形の影響と考えられ、本制御の場合には、渦放出周波数のみにピークを持つ制御信号においてより大きな制御効果が期待されることを示唆する。

**3.4 流体力特性** 図7は、アクティブ制御時および無制御時における円柱に加わる位相平均抗力係数  $C_{d\theta}$  ( $=F_x/\rho U^2R$ ) と揚力係数  $C_{l\theta}$  ( $=F_y/\rho U^2R$ ) を算出し、渦放出の位相角  $\psi$  に対して示した結果である。ただし、 $F_x, F_y$  は、円柱の単位長さ当たり働く主流およびそれに垂直方向の流体力である。なお、渦放出の位相角  $\psi$  は参照速度変動が負から正となる位置を  $0^\circ$  とし、測った角度で、渦放出の1周期を  $360^\circ$  と定義する。図には、アクティブ制御結果として、最適参照プローブ位置 ( $x/R=4, y/R=-2.4R$ ) 及び既報<sup>(9)</sup>のプローブ位置 ( $x/R=3, y/R=-1.6$ ) における  $C_{d\theta}, C_{l\theta}$  の測定結果を示したが、いずれも無制御時である静止円柱の結果より小さな  $C_{d\theta}, C_{l\theta}$  が得られ、アクティブ制御による流体力特性の改善が見られる。また、両アクティブ制御結果を比較すると、最適参照プローブ位置での制御結果は、より強く流体力特性の改善効果を示しており、アクティブ制御効果は固定プローブ位置での速度変動のみでなく、円柱に加わる流体力の低減にも有効であることを示唆する。ただし、アクティブ制御時においても静止時と同様な渦位相  $\psi$  による  $C_{d\theta}, C_{l\theta}$  の変化が得られており、1周期の渦放出に対して2回の抗力変動、1回の揚力変動が生じている。

#### 4. 結 論

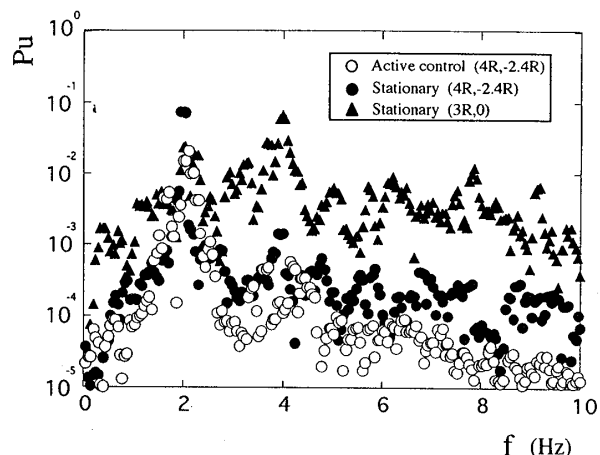


Fig.6 Power spectrum of reference velocity fluctuations

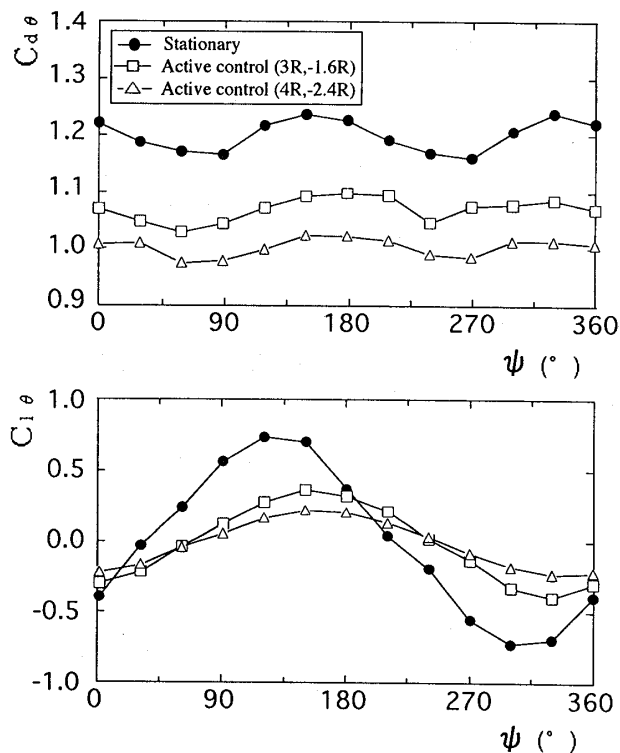


Fig.7 Phase-averaged drag and lift coefficient  $c_{d\theta}, c_{l\theta}$  in relation to phase angle  $\psi$  of vortex formation  
(a) Drag coefficient  $c_{d\theta}$ , (b) Lift coefficient  $c_{l\theta}$

円柱の回転振動による渦放出のアクティブ制御にニューラルネットワークを適用し、最適制御パラメータの探索と制御効果増大の可能性についての実験的検討を行い、以下の結論を得た。

(1) 本研究のニューラルネットワークは、位相遅れとフィードバック係数の最適組合せを得るのに有効な方法であり、評価関数の積分範囲の採り方に注意すれば、

ここで対象とする渦放出現象のアクティブ制御に適用可能である。

(2) アクティブ制御効果が参照プローブ位置に依存することを示し、その最適位置をニューラルネットワークを用いた本制御を適用して決定した。最適参照プローブ位置は円柱下流外側寄りに広がりを示す。

(3) アクティブ制御時における円柱の流体力特性を実験的に明らかにし、最適参照プローブ位置における制御円柱の抗力変動と揚力変動は、静止円柱および他の参照プローブ位置での制御結果より小さくなることを示した。

### 文献

- (1) Blevins, R.D., Flow-Induced Vibration, (1990), 43, Van Nostrand Reinhold.
- (2) Griffin, M. and Hall, M.S., Trans. ASME, J. Fluids Eng., 113 (1991), 526.
- (3) Ffowcs Williams, J.E. and Zhao, B.C., J. Fluids Struct., 3 (1989), 115.

- (4) Roussopoulos, K., J. Fluid Mech., 248 (1993), 267.
- (5) Fujisawa, N. and Warui, H.M., Proc. FLUCOME, Toulouse, (1994), 113.
- (6) 藤沢延行・ワルイ, H.M., 機論, 61-585, C (1995), 1827.
- (7) 藤沢延行・川路泰司, 機論, 61-585, C (1995), 1832.
- (8) Warui, H.M. and Fujisawa, N., Exp. Fluids, 21 (1996), 49.
- (9) 藤沢延行・ほか2名, 機論, 62-593, B (1996), 109.
- (10) 李連進・長屋幸助, 機論, 61-586, C (1995), 2259.

### 付録

ニューラルネットワーク学習における  $n$  ステップ後の結合荷重を  $W_n$ 、誤差評価関数を  $E_n$  とすると、 $n+1$  ステップ後の結合荷重  $W_{n+1}$  は、次式の最急降下式で表される。

$$W_{n+1} = W_n - \mu \partial E_n / \partial W_n \quad (1)$$

同様に入力関数  $X_n$  は、次式で修正される。

$$X_{n+1} = X_n - \eta \partial E_n / \partial X_n \quad (2)$$

ただし、式(1)、式(2)に含まれる収束係数  $\mu$ 、 $\eta$  は、本研究では、 $\mu=0.5$ 、 $\eta=0.1$  に設定した。