

## エッジトーン現象のアクティブ制御と制御機構に関する基礎研究\*

藤沢 延行<sup>\*1</sup>, 河野 隆志<sup>\*2</sup>, 高野 剛<sup>\*1</sup>

## Basic Study on Active Control of Edge Tone and Control Mechanism

Nobuyuki FUJISAWA<sup>\*3</sup>, Takashi KOUNO and Tsuyoshi TAKANO<sup>\*3</sup> Niigata University, Dept. Mechanical and Production Engineering,  
8050 Ikarashi-2, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

The performance of active feedback control of edge tone phenomenon by the control flow is investigated experimentally and the mechanism is discussed. It is found that the pressure fluctuations over the edge surface are reduced by this control roughly to those of the free jet. The optimum conditions for the phase lag and amplitude of the control flow are obtained quantitatively for various edge distances from the jet nozzle. These results show that the present control technique is very effective for weakening the flow oscillation of the jet-edge system. The flow visualization study suggests that the control mechanism is due to the cancellation of pressure fluctuations created at the edge by the imposed velocity fluctuations.

**Key Words:** Flow Control, Active Control, Unsteady Flow, Edge Tone, Flow Visualization

## 1. 緒 言

噴流がくさび状物体に衝突すると、噴流軸に垂直方向に規則的な自励振動を発生し、いわゆるエッジトーン現象が発生する。この現象は、流体関連振動や騒音の発生原因であることから工学上重要であり、流体騒音の発生機構<sup>(1)-(10)</sup>や騒音レベルの低減<sup>(11)-(14)</sup>などについての研究が活発に行われてきた。過去の研究報告<sup>(1)</sup>によると、エッジトーン現象の発生機構は、噴流がくさびに衝突する際に発生する圧力変動が上流側に伝播し噴流出口付近のせん断層を励起し、それが再びくさび部の圧力変動を強めるフィードバックループを形成するためと考えられている。したがって、その騒音低減においては、フィードバックループの形成を断ち切るような手段が有効であり、これまでも種々のパッシブな制御法<sup>(11)-(14)</sup>が提案されている。しかしながら、円柱後流<sup>(15)-(18)</sup>、はく離せん断層<sup>(19)</sup>など種々の流れ場に対してアクティブ制御の適用がしばしば検討され始めており、今後の適用範囲の拡大と制御性能の改善が期待されている。Ziada<sup>(19)</sup>は、エッジトーン現象に対して

アクティブ制御法を初めて適用し、その有効性を示唆した。しかしながら、制御パラメータについての定量化や制御機構についての検討など多くの流体力学的課題については不明のままであり、更なる今後の検討が待たれている。

本研究では、エッジトーン現象に対するフィードバック制御の有効性と制御機構を明らかにするため、それを支配する制御パラメータの影響とその制御機構をくさび表面の圧力変動測定と流れの可視化による観察から検討することを目的とする。

## 2. 実験装置および方法

**2-1 実験装置** 図1に実験装置の概略を示す。供試風洞吹出し口下流側(断面寸法200mm×200mm)にノズル出口幅 $d=20\text{mm}$ の二次元ノズル(奥行き200mm)を水平に固定し、さらにその下流側に頂角 $28^\circ$ の二等辺三角形のくさびを設置して、噴流くさび系の実験装置とした。ただし、くさび状物体の流れに垂直方向の最大高さは20mmであり、その下流側には厚さ20mmの平板を固定した。くさびの先端はノズル中心と一致するように置かれており、くさびの付いた平板は両側の端板の溝に沿って移動させることで、くさび状物体とノズル間の距離 $x$ を任意に変化できるようにした。また、くさび先端からくさび面に沿って22mmの上下面位

\* 原稿受付 1999年11月19日。

<sup>\*1</sup> 正員, 新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。<sup>\*2</sup> 学生員, 新潟大学大学院

E-mail: fujisawa@eng.niigata-u.ac.jp

置には直径1mmの圧力孔が設けられており、そこでの圧力をステンレス製導管を通してひずみゲージ式圧力変換器で観測できるようにした。ただし、本実験で使用した圧力変換器は、200Hzまで平坦な周波数特性を有している。一方、噴流吹出し口付近の上下には制御用スピーカが2個取り付けられており、噴流の上下から発振現象を制御するための変動流を制御ノズルを通して供給できるように設計した。ただし、制御変動流の吹出し口高さは3mmである。なお、以上の供試ノズル、くさび、制御ノズルは、いずれもスパン方向に200mmの幅を有している。

**2・2 制御システム** 本実験のフィードバック制御は、くさび上面で検出した圧力変動をAD変換しコンピュータで位相ならびにゲインを変化させた後DA変換し、さらに電力増幅した信号を2個のスピーカの入力信号として使用する。したがって、制御信号の位相とゲインはコンピュータで任意に変化させることになる。一方、予備実験において、くさび表面圧力変動と制御ノズルからの速度変動の同時測定を行い、両信号間の位相を調べたところ、本実験の周波数範囲において5-10ms程度の遅れが認められた。この主因は、制御ノズルにおける信号の遅れによるものであるが、本実験では、周波数ごとにこの遅れを計測し、この関係に基いて位相遅れを補正した。ただし、制御ノズル出口部の速度変動は、熱線流速計を用いて測定した。その速度検定には、低速であるため、あらかじめ中空トレーサ粒子を用いたPIV法による速度とプロア回転数の関係を測定しておき、制御ノズル出口部の速度を測定した。ここに、制御ノズル出口における速度変動

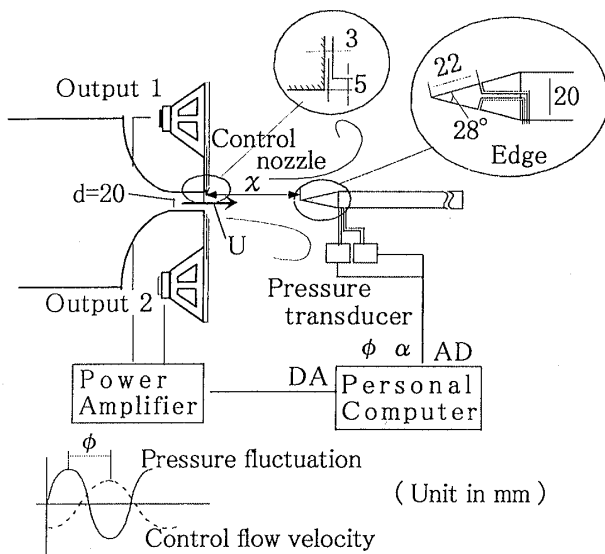


Fig. 1 Experimental apparatus and control system

は、振動流であるため、その速度振幅  $v$  によって制御流の大きさを表すことにした。以下では、それをノズル出口速度  $U$  で無次元化して制御流振幅  $\alpha (=v/U)$  で示す。実験は、ノズル出口流速  $U=10\text{m/s}$ 、 $15\text{m/s}$ 、 $20\text{m/s}$  で行ったが、それらはノズル出口幅  $d$  に基づくレイノルズ数  $(=Ud/\nu)$  に換算するとそれぞれ13200、19800、26500である ( $\nu$ : 流体の動粘度)。

**2・3 流れの可視化** 流れの可視化は、スモーク供給装置で作ったスモークを供試吹出し型風洞のプロア吸込み口から直接供給して行った。光源としては、アルゴンイオンレーザー4Wをシート状にして装置上側から照射し、二次元噴流の中央断面付近における流れ場を可視化した。ただし、供試くさび、下流側平板ならびにこれらを固定する端板はアクリル製であり、一方の端板を通してくさび付近の全流れ場を観測できるようにした。なお、その観測には、モノクロCCDカメラ(768×494ピクセル)を用いた。ただし、可視化観測と同時にくさび面の圧力変動の時間変化も同時計測することで、種々の圧力位相における流れ場の条件付き可視化観測<sup>(20)</sup>を行った。

### 3. 結果および考察

**3・1 無制御時の流動特性** 図2は、くさび面で検出された圧力変動係数  $C_p' (=2\sqrt{p'^2}/\rho U^2)$  がノズル出口からくさび先端までの距離  $x/d$  によって変化する関係である。ただし、 $p'$ : 圧力変動、 $\rho$ : 流体の密度である。圧力変動係数  $C_p'$  の分布は、わずかにレイノルズ数の影響を受けるが、いずれの流速  $U$  の結果においてもノズルからの距離  $x/d=5$  付近で最大となる分布形状を示す。このような圧力変動と距離  $x/d$  の関係は、くさび形状、圧力測定位置ならびにレイノルズ数の影響を受けるため、過去の結果<sup>(9)</sup>との定量的比較は困難であるが、分布形状ならびに分布が最大となる位置につ

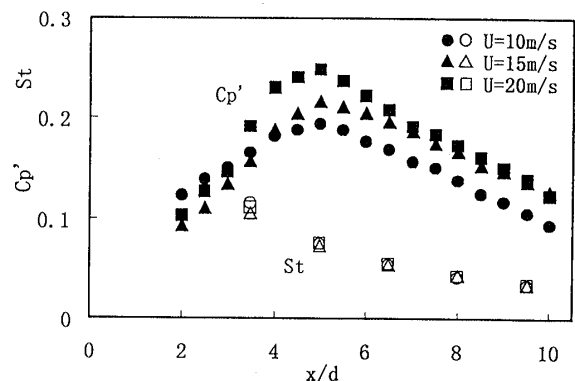


Fig. 2 Distributions of fluctuating pressure coefficient  $C_p'$  and Strouhal number  $St$

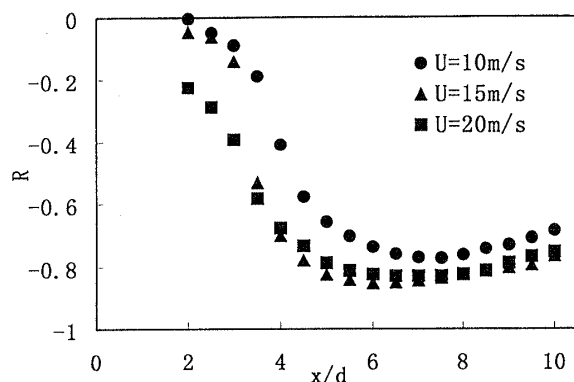


Fig. 3 Distributions of correlation coefficient  $R$  of fluctuating pressure

いての定性的一致は得られている。したがって、 $x/d=5$  付近における  $C_p'$  の増加は、過去の実験<sup>(1)-(10)</sup>と同様に、エッジトーン現象の発生によるものと考えられる。図2には、圧力変動の支配周波数  $f$  からストロハル数  $St (=fd/U)$  を算出した結果も示した。ストロハル数  $St$  は、距離  $x/d$  の増大と共に徐々に減少する傾向を示すが、その関係は圧力変動分布に見られたようなレイノルズ数の影響は認められない。なお、本実験の  $C_p'$ ,  $St$  の不確かさは、約95%の包括度で、それぞれ5.2%と5.0%である。

図3は、くさび上下の圧力変動の相互相関係数  $R (=p_1' p_2' / \sqrt{p_1'^2} \sqrt{p_2'^2})$  と距離  $x/d$  の関係である。ここに、添字1,2はそれぞれくさびの上下を表す。いずれの流速  $U$  においても  $x/d$  が4付近より大きくなると相互相関係数は負の大きな値を示し、エッジ上下面において互いに反対の圧力変動を示す発振現象が生じていることがわかる。このことが、図2の圧力変動の増大に寄与していると考えられる。一方、 $x/d$  が4以下の領域ではエッジ上下面間の圧力変動の相関は小さく、規則的な発振現象は弱まることになる。なお、本実験の  $R$  の不確かさは、約95%の包括度で、11.6%である。

**3.2 アクティブ制御時の流動特性** 図4は、本実験の噴流くさび系に対しフィードバック制御を適用した際の圧力変動係数  $C_p'$  の変化を示す。ただし、実験結果はノズル出口流速  $U=15\text{m/s}$  の場合である。制御信号としてはくさび上面の圧力変動信号を用い、それに対し位相遅れとフィードバックゲインをコンピュータで設定してスピーカから変動制御流を与えた。ここでは、制御信号の出力位置がノズル上部、ノズル下部、そしてノズル両側の3種の場合について検討した。このうち、くさびの両側からの2出力の場合には、予備実験の結果から、上下のスピーカに対する制御信号入力は逆位相時に最適な制御効果が得られたことから、

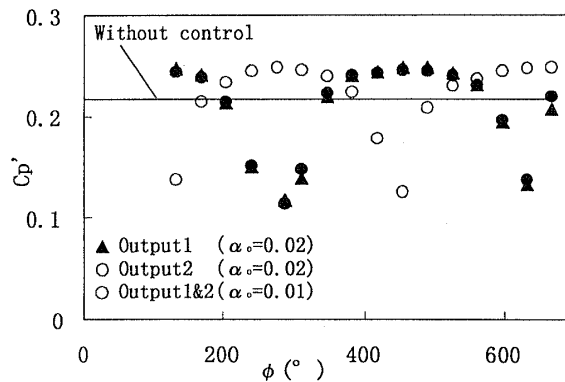


Fig. 4 Effect of phase lag  $\phi$  at optimum oscillation amplitude ( $x/d=5$ ,  $U=15\text{m/s}$ )

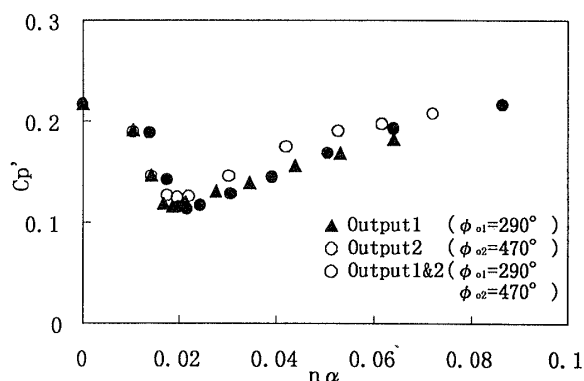


Fig. 5 Effect of oscillation amplitude  $\alpha$  at optimum phase lag ( $x/d=5$ ,  $U=15\text{m/s}$ )

それに固定した。なお、これらの結果はいずれも圧力変動係数  $C_p'$  が最も小さくなるように最適な制御流振幅  $\alpha_0$  を選択したときの結果である。図4によると、いずれの制御出力においても、圧力変動係数は位相遅れの影響を強く受け、ある位相遅れにおいて圧力変動係数は最小値を示すことが分かる。しかしながら、出力1と出力2の結果からわかるように、制御信号の出力スピーカを上下反対にすると、両者の最適位相遅れは約180°変化する。これは、図3に示したように、くさび部に形成される流れ場がその上下で逆位相の関係にあるためである。一方、制御信号の出力スピーカがノズル上側の場合と両側の場合の結果 ( $\phi = \phi_1$  の場合) は、かなり良く一致しており、いずれも位相遅れ  $\phi = 290^\circ$  付近で  $C_p'$  は最小になる。このことは、一方のせん断層に対し制御を加えるだけで十分な制御効果が得られることを示すと同時に、この  $C_p'$  の最小値は無制御時よりも小さく、制御による圧力変動の抑制効果を示す。また、1出力の制御流振幅は  $\alpha_0=0.02$  であるのに対して、2出力の場合には  $\alpha_0=0.01$  となり、制御流振幅が半分となっていることは注目すべきである。

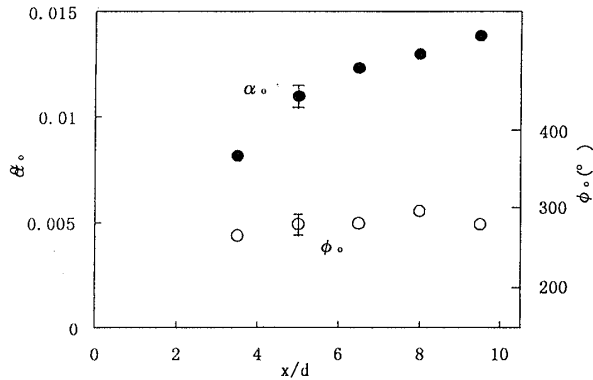


Fig. 6 Distributions of optimum control parameters  $\alpha_0$  and  $\phi_0$ .

このことは、いずれの場合にも供給する制御エネルギーは等価であることを示唆する。一方、最適位相遅れ  $\phi_0=290^\circ$  に対し逆位相となる  $\phi_0=470^\circ$  付近では圧力変動は最大となり、またその値は無制御時より大きく、発振現象が強められたことを示す。

図5は、位相遅れを最適値  $\phi_0$  に固定し、スピーカに供給する制御流振幅を種々変えた場合の圧力変動係数分布である。ただし、図5の横軸は出力数  $n$  と制御流振幅  $\alpha$  の積で表した。いずれの結果においても、 $n\alpha=0.02$  付近において圧力変動係数  $Cp'$  が最小値を示すこと、ならびにいずれもほぼ一致した分布形状となる。無制御時 ( $\alpha=0$ ) の圧力変動係数  $Cp'$  ( $=0.22$ ) と比較すると、位相遅れと制御流振幅を最適にした最適制御時の  $Cp'$  は、0.12程度まで減少しており、圧力変動は約半分程度に減少したことになる。このように、最適制御時には制御出力の位置や数による制御効果の違いは少なく、以下では上下逆位相2出力での実験結果について詳しく考察する。

図6は、本制御実験においてノズルからくさび先端までの距離  $x/d$  を種々変えたときの最適位相遅れ  $\phi_0$  と最適制御流振幅  $\alpha_0$  の変化関係を示す。ただし、 $U=15\text{m/s}$  の結果である。ノズルからの距離  $x/d$  が増大しても、最適位相  $\phi_0$  はほぼ一定の値  $\phi_0=290^\circ$  を示す。これは、くさびによって誘起された圧力変動がノズルから発達するせん断層に伝播し制御に至る時間が十分短いため、最適位相遅れがくさび位置の影響を受けないと考えられる。一方、最適制御流振幅  $\alpha_0$  は距離  $x/d$  とともに増大する傾向にある。これは、くさびが遠のくほど強い制御流が必要であることを示唆する。

図7は、本実験のエッジトーン現象に対してアクティブ制御を適用した際のくさび面上の圧力変動ならびにストロハル数がくさび位置  $x/d$  によって変化する関係を示す。本アクティブ制御によるくさび表面の圧

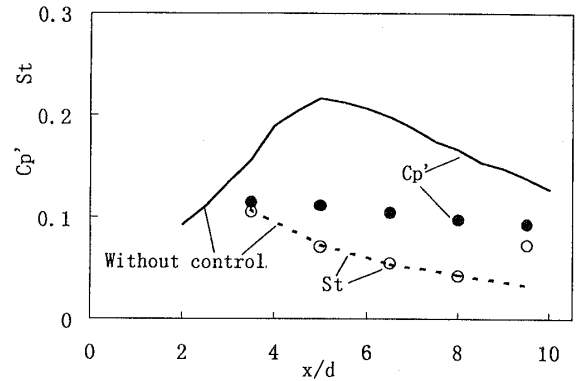


Fig. 7 Distributions of fluctuating pressure coefficient  $Cp'$  and Strouhal number  $St$  under optimum control

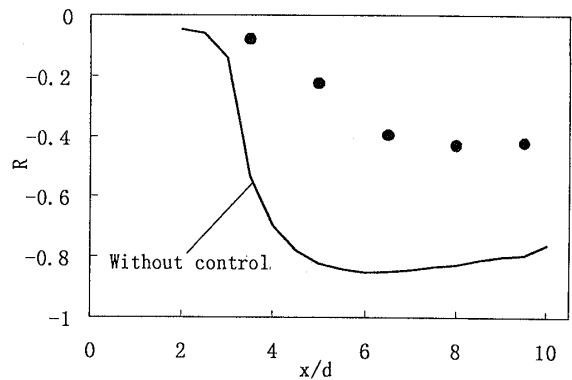


Fig. 8 Distributions of correlation coefficient  $R$  of fluctuating pressure under optimum control

力変動の抑制効果は、いずれの  $x/d$  の位置においても認められる。しかしながら、その抑制効果の大きさは位置の関数であり、最も大きな抑制効果は  $Cp'$  が最大値を示す  $x/d=5$  付近で得られている。なお、最適制御時の  $Cp'$  の分布は  $x/d$  が増すとわずかに減少するが、ほぼ一定の分布形状である。このことは、制御効果によって噴流くさび系に発生する特定周波数における発振現象が抑制されたことを示す。一方、ピトー管の静圧孔を利用して、本実験でのくさびを取り外した状態の二次元自由噴流における静圧変動を測定したところ  $x/d=3.5-9.5$  の範囲で  $Cp'=0.08$  であった。この結果は、本実験の噴流くさび系における制御時の圧力変動係数  $Cp'=0.12$  よりわずかに小さい値であり、本制御結果は自由噴流の場合に漸近すると考えられる。このことは、本制御が特定の周波数成分に対してのみ有効であるため、それ以外の周波数成分に対する影響は小さいことを示唆する。一方、図7によると、ストロハル数の分布は無制御時とほぼ一致しており、本制御が噴流くさび系の発振周波数に対する影響は小さい。

図8は、くさび上下面間の圧力変動の相互相関係数

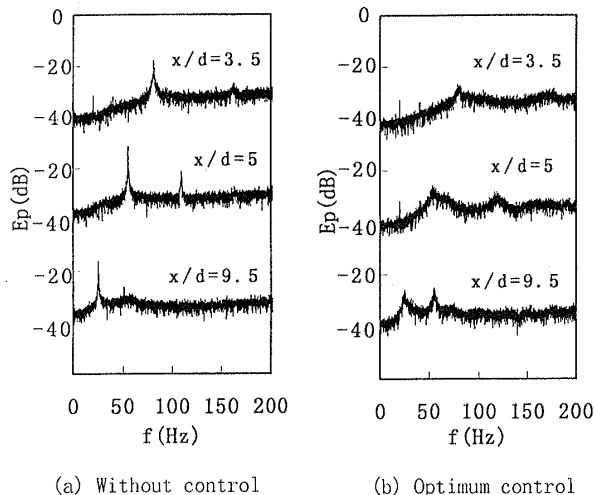


Fig.9 Amplitude spectrum of fluctuating pressure over edge surface

Rの値がくさび先端位置  $x/d$  によって変化する関係を制御時ならびに無制御時について示した結果である。制御時の相関係数は、くさび位置が増加すると徐々に減少しており、無制御時と同様な分布形状を示す。しかしながら、定量的には、無制御時の  $x/d > 4$  で見られた強い負の相関  $R = -0.8$  は制御時には  $R = -0.4$  程度の値を示し、圧力変動の相関は制御により抑制される。このことは、本制御はくさび上下面に形成される規則的流れパターンの抑制に対し有効であり、その結果規則的パターンは弱まることになる。一方、 $x/d < 3.5$  では制御の有無に関わらず負の相関係数は小さく、ランダムな流れパターンを示すことが予期される。したがって、このような場合には本制御は有効とは言えず、図7に示したように本制御による圧力変動の抑制効果は小さい。

図9は、種々のくさび位置  $x/d$  におけるエッジ上面の圧力変動の周波数分析結果であり、それを無制御時(a)と最適制御時(b)について比較して示した。ただし、図の縦軸は、 $C_p' = \int_0^\infty E_p df$  で定義される振幅スペクトル関数  $E_p$  であり、横軸  $f$  は周波数 (Hz) である。無制御時における結果によると、かなり明瞭な特定の周波数における圧力変動のピークがいずれのくさび位置の結果においても認められており、噴流くさび系における発振現象の発生を示す。ただし、いずれのくさび位置においても基本調波に対応する1次ピークならびにその2倍の周波数における2次ピークが認められる。くさび位置  $x/d = 5$  の結果によると、1次と2次の圧力変動成分のピークは共に、他のくさび位置より大きく、図2の圧力変動の測定結果と対応する。一方、制御時における周波数分析結果によると、いずれのくさび位置においても、圧力変動のピーク値はかなり小さくな

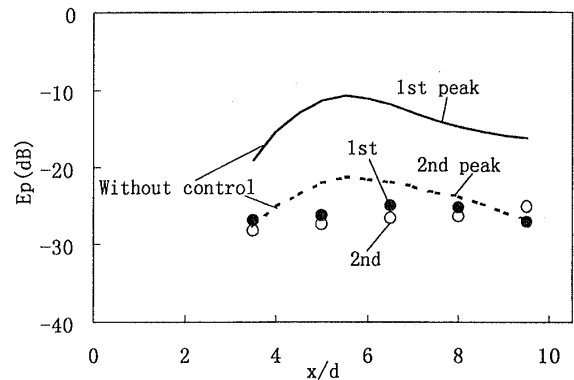


Fig.10 Peak amplitude spectrum of fluctuating pressure under optimum control

り、より平坦な分布形状を示す。ここに、圧力変動のピークの減少に対応して、ピーク周波数付近では圧力変動成分に多少の増大傾向が見られており、その結果として分布形状が平滑化されることがわかる。一方、くさび位置  $x/d = 9.5$  の結果によると、制御によって2次ピークがかなり増大しており、その大きさは1次ピークより大きくなる。これは、制御によって発振モードが遷移<sup>(10)</sup>したことを示す。

図10は、このような周波数分析結果から1次ならびに2次の圧力変動のピーク値を読み取り、くさび位置  $x/d$  との関係を示した結果である。無制御時には、1次と2次ピークいずれも  $x/d = 5$  付近に最大を持つ分布形状であり、図2に示した  $C_p'$  の測定結果と同様である。一方、制御時には1次2次いずれのピークもくさび位置に依らずより平坦な分布形状を示す。ここに、制御による圧力変動の減衰効果は  $x/d = 5$  の位置の1次ピークに強く認められ、その減衰量は15dB程度である。2次ピークにも同様の減衰効果が認められるが、その減衰量は小さい。このとき、くさび位置が下流方向へ移動すると、2次ピークは徐々に増大し、 $x/d = 9.5$  では先にも述べたように2次ピークが1次ピークより大きくなる。

図11は、くさび上面の圧力変動の計測と同時にくさび周りの流れ場を可視化観測した結果であり、無制御時と最適制御時の結果を対比して示す。ただし、くさび上面の圧力変動の時間変化の最大(a)および最小(b)における流れ場の可視化結果を示した(図1の圧力波形参照)。無制御時における結果を見ると、圧力が最大時にはくさび上面側のスモークは減少し、くさび面に沿う増速流の発生が予期される。それに対し、くさび下面側ではスモークが増大し、減速流の発生を示唆する。一方、圧力の最小時には、最大時とは反対にくさび上面には減速流、下面には増速流が観測される。

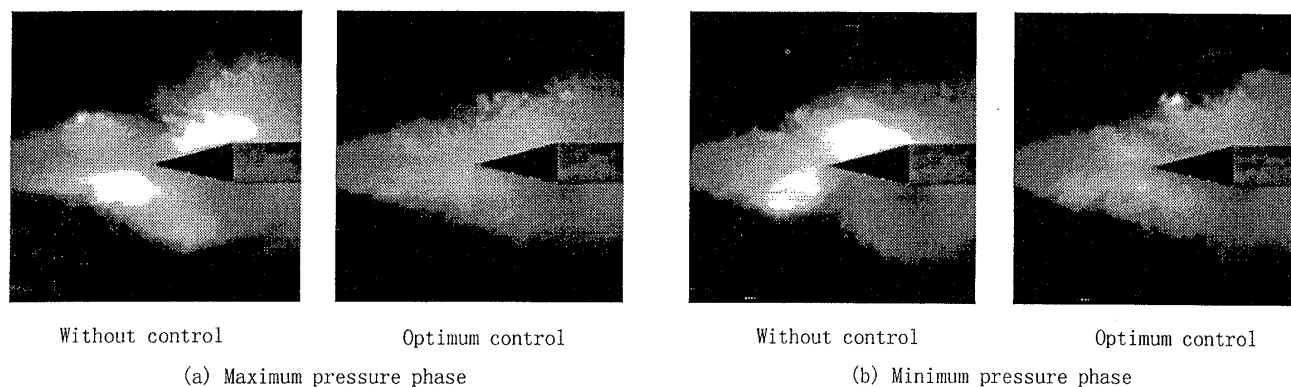


Fig. 11 Flow visualizations with respect to pressure phase

このように、無制御時ではくさび表面の圧力変動と流れ場の間には強い相関が観測され、図3に示したように、くさび上下面間には強い負の相関が発生したことに対応する。一方、最適制御結果を見ると、このようなくさび周りに発生する流れ場の発振現象は、かなり強く抑制され、圧力変動の位相に関わらず流れはくさび軸に対し対称に下流方向に発達する。このことは、本制御によって、噴流くさび系に形成される流体の発振現象が抑制されたことを示しており、この制御法の有効性を示唆する。

#### 4. 結 言

噴流・くさび系における発振現象の制御とそのメカニズム解明を目的とし、くさび面の圧力変動をフィードバックし、ノズル部付近に取り付けたスピーカから微小擾乱を与えるアクティブ制御法を実験的に検討し、以下の結論を得た。

(1)本アクティブ制御によって噴流くさび系に発生する発振現象を制御するためには、最適な位相遅れと制御流振幅の組み合わせが重要であり、これらの最適値を定量的に示した。本実験の範囲では、最適位相遅れは $290^\circ$ 付近で、それはくさび位置に依らず、制御流振幅は0.02程度であるが、それはくさび位置によって変化する。

(2)本アクティブ制御は、くさび表面の圧力変動の発振周波数成分を抑制するのに有効であり、制御下における圧力変動はくさび位置に依らずほぼ一定の値を示す。

また、この圧力変動値は、自由噴流の場合に漸近する。(3) くさび表面の圧力変動の測定と同時にスモークによる流れ場の可視化観察を行い、圧力パターンによる流れパターンの変動の観察と本制御による発振現象の抑制効果を示した。

#### 文 献

- (1) Rockwell, D. and Naudascher, E, Ann. Rev. Fluid Mech., 11(1979), 67-94.
- (2) 林叡・他3名, 計測制御論, 16-6(1989), 892-897.
- (3) Lucas, M. and Rockwell D., J. Fluid Mech., 147(1984), 333-352.
- (4) 望月修・ほか2名, 機論51-467(1985), 2258-2264.
- (5) 社河内敏彦・ほか3名, 機論51-469(1985), 2897-2907.
- (6) Kaykayoglu, R. and Rockwell D., J. Fluid Mech. 169 (1986), 125-149; 151-172.
- (7) Krorhapalli, A. and Horne, W. C., AIAA J., 24-8(1986), 1385-1388.
- (8) 社河内敏彦・ほか2名, 機論52-480(1986), 2872-2880.
- (9) 佐野学, 水牧祥一, 機論54-500(1988), 791-797.
- (10) Haga, A. and Hosoi, Y., Third Asian Symposium on Visualization, Chiba, 1994, 149-154.
- (11) 白浜芳郎・ほか2名, 機論57-542(1991), 3402-3407.
- (12) 池田敏彦・ほか3名, 可視化情報, 15-58 (1995), 183-189.
- (13) 池田敏彦・ほか4名, 機論62-597(1996), 1841-1846.
- (14) 池田敏彦・ほか4名, 航宇誌, 45-522(1997), 404-410.
- (15) Ffowcs Williams, J. E. and Zhao, B. C., J. Fluids Struct., 3(1989), 115-122.
- (16) 藤沢延行, ワルイ, H. M., 機論61-585(1995), 1827-1831.
- (17) 藤沢延行, 川路泰司, 機論61-585(1995), 1832-1836.
- (18) Warui, H. M. and Fujisawa, N., Exp. Fluids, 21(1996), 49-56.
- (19) Ziada, S., J. Fluids Struct., 9(1995), 907-923.
- (20) 藤沢延行・他2名, 機論62-593(1996), 109-114.