エッジ音の制御に関する実験研究*1 Experimental Study on Control of Edge Tone

池田 敏彦*2・徳永 淳一*3
Toshihiko IKEDA, Zyunichi TOKUNAGA,
土屋 良明*2・長澤 忠延*4
Yoshiaki TSUCHIYA, Tadanobu NAGASAWA
堀越 長次
and Tyozi HORIKOSHI

Key Words: Fluid Dynamics, Unsteady Flow, Jet, Edge Tone

Abstract

The purpose of this paper is to control edge tone generated by flow of a jet-wedge system. An attempt to control the edge tone has been carried out by attaching projecting objects to the nozzle exit. It is found that the edge tone is reduced even though a pair of projecting objects is attached to the nozzle exit. In addition, the effect of attached projecting objects upon the spectrum intensity of predominant frequency of the pressure fluctuation at the wedge is examined. We also found that the spectrum intensity decreases with the increase of the number of projecting objects. The spectrum intensity is minimized at the point which is located downstream from the position of the attached projecting objects.

1. はじめに

噴流がその軸上におかれたくさび形物体や円柱などの障害物に衝突するとき、噴流は軸と直角方向に自励発振する。この噴流の自励発振現象に関する研究は、流体力学および音響学の立場から数多く報告がなされている^{1~11)}。特に、作動流体が空気の場合には、エッジ音と呼ばれる自励音が発生する。噴流の発振機構は、圧力フィードバック説により説明される¹²⁾。すなわち、圧力フィードバック説におけるフィードバックループは次の四つの過程(i)~(iv)により構成され、これにより噴流の周期的な発振は維持される。

(i) 噴流がくさび形物体などの障害物に衝突するとき、衝突領域で攪乱(圧力変動)が生じる。

(ii) 衝突領域で生じた圧力変動が上流へフィードバックされる。

(iii) フィードバックされた圧力変動が噴出口近傍のせん断層に局所的な渦度変動を誘起する。

(iv) この渦度変動が噴出口と衝突領域の間に増幅されて、せん断層に渦が形成され、成長する。

本研究は、噴流・くさび形物体系の流れで生じるエッジ音の低減化を目的とする。従来から、エッジ音の低減化に関する報告がなされている。望月らは噴流・円柱系流れで、円柱表面に埋め込んだ吸音材により、衝突領域で生じる圧力変動を弱めることにより、自励音の音圧レベルを低減させた¹³⁾。また、Mochizukiらは噴流・円柱系の流れで、円柱後端に薄い仕切板を取付けて、円柱からはく離渦に影響を与えることにより音圧レベルを低減させた¹⁴⁾。朴らは、半円柱を前縁形状にもつ翼を用いて、円柱の場合とは異なった物体からはく離の状況を作り出すことにより音圧レベルを低減させた¹⁵⁾。白浜らは噴流・円柱系流れで、円柱を噴流軸からオフセットする方法、円柱を噴流の中心面内で傾ける方法、噴出口の短辺方向に制御円柱を設置する方法により音圧レベルを低減させた¹⁶⁾。佐野らは噴流・くさび形物体系流れで、噴出口とくさび形物体の間に遮断板を噴流軸と直角に設置してフィードバックの経路を遮断することにより、自励音の音圧レベルを低減させた¹⁷⁾。著者らは噴流・くさび形物体系流れで、噴流軸と直角に設置した遮断板により、噴流の発振が停止することを水流を用いた可視化実験で示した¹⁸⁾。また、著者らは噴流・くさび形物体系流れで、噴流軸と平行に側板を設置して、噴出口近傍の周囲流体の巻き込みを抑制することにより、せん断層における局所的な渦度変動の誘起を抑制して、音圧レベル

*1 平成8年7月11日原稿受理

*2 信州大学工学部生産システム工学科

*3 アイシン・エイ・ダブリュ

*4 長野県短期大学

を低減させた¹⁹⁾。

本研究におけるエッジ音の制御は、噴流の発振機構の過程(iv)に関連する。ノズル噴出口の長辺方向に三角形断面の突起物を設置して、噴流のせん断層に形成される渦を長辺方向に非一様にする。これにより、フィードバックのループを弱めたりあるいは破壊したりすることで、エッジ音の制御を試みた。この結果、ノズル噴出口に突起物を設置することにより、エッジ音が制御されることがわかったので報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を第1図に示す。送風機から発生する騒音を減少させるため、その内側に吸音材であるグラスウールを装備した収納箱1内の送風機2(室外に設置)から送風された空気は、冷却器3により冷却されて室内に導かれる。その後、グラスウールを用いて製作された消音エルボ5と消音ダクト6により減音されて、整流チャンバ9に入る。チャンバ内で整流格子

第1図 実験装置 (単位 mm)

第2図 測定部 (単位 mm)

第3図 噴出口に設置した突起物

7とスクリーン8により整流された空気はノズル10から測定部へ噴出する。測定部には、噴流軸上にくさび形物体11が設置されている。

第2図に測定部を示す。使用した長方形断面ノズルはノズル幅(短辺) $w=10$ mm, 長辺 $h=150$ mm (縦横比 $h/w=15$), 絞り比は10である。くさび形物体は頂角30度, 後端幅10 mm, スパン方向の長さは300 mmである。噴出口からくさび形物体先端までの距離(くさび距離)を L_s とした。なお, 本実験において噴出口中心における軸速度 $U_0=20$ m/s (一定) にした。このときのレイノルズ数 $Re(=U_0 \cdot w/\nu)$ は 1.33×10^4 である。ここで, ν は空気の動粘度である。座標系は噴出口中心を原点とし, 噴流軸に沿って下流方向に x 軸, ノズル幅方向に y 軸, ノズルの長辺方向に z 軸とした。

第3図に噴出口に z 軸に関して対称に設置した三角形断面の突起物を示す。丸田²⁰⁾は低騒音風洞の開発にあたって, 風洞ノズルの先端部の境界層中に三角錐や半円錐を多数設置して, ノズル先端からの放出渦を周方向に非一様にするることにより, ノズル吐出気流発生騒音を低減させている。丸田の実験は, 本実験における噴出口への突起物の設置は, 噴流のせん断層に形成される渦を長辺方向に非一様にするであろうことを示唆している。これによりフィードバックのループが弱められたりあるいは破壊されたりして, エッジ音が制御されることは十分に予想される。本実験では, 製作が比較的容易であることから突起物として頂角60度の三角形形状のものを用いた。突起物の厚さは1 mmである。予備実験により, 突起物の高さ a を1 mm または2 mm に設定し, 突起物の間隔 b すなわち z 軸に関して対称に配置した突起物の対の数 NP を変化させた。第3図には $NP=3$ の場合を配置の一例として示した。

エッジ音の音圧レベル SPL は精密騒音計の F 特性で測定した。マイクロホンはくさび形物体先端上方300 mm の位置(音波の波長より十分短い位置)に設置した。また, 噴流の発振機構の過程(i)に関連して, くさび形物体先端近傍に生じる圧力変動を圧力変換器を用いて測定した。音圧変動波形, 圧力変動波形とそれぞれの周波数スペクトルは周波数分析器を用いて求めた。

なお, 送風機を作動させない場合の暗騒音の音圧レベルは57 dBであった。くさび形物体を設置せずに送風機を作動させたときの音圧レベルは72 dBであった。この場合の音圧変動波形を第4図(a)に, その周波数スペクトルを第5図(a)にそれぞれ示す。

3. 実験結果

最初に、 Ls/w を一定にして、三角形の突起物の高さ a を1mmまたは2mmに設定し、突起物の間隔 b すなわち突起物の対の数 NP を変化させたときの音圧変動波形とその周波数スペクトル、音圧レベルSPL、音圧変動の卓越周波数 N の音圧レベル SPL_N 、噴流発振のストローハル $St_N(=N \cdot w/U_0)$ について述べる。つぎに、くさび形物体先端近傍に生じる圧力変動波形とその周波数スペクトル、圧力変動の卓越周波数のスペクトル強度 P_t について述べる。最後に、SPL, St_N と Ls/w の関係について述べる。

3.1 SPL, SPL_N , St_N に及ぼす突起物の影響 音圧変動波形を第4図に、音圧変動波形の周波数スペクトルを第5図にそれぞれ示す。比較のため、音圧変動波形の横軸、縦軸のスケールは同じにしてある。第4図(a)と第5図(a)はすでに述べたように、くさび形物体を設置しない場合である。第4図(b)と第5図(b)は突起物を設置せずに、後述の第14図に示すように音圧レベルがほぼ最大値を示す位置($Ls/w=4$)にくさび形物体を設置した場合である。第4図の(a)に比べて(b)では、音圧変動波形の振幅は明らかに大きく、第5図(b)からわかるように、スペクトルに $N=215\text{ Hz}$ の卓越周波数が現れている。問題は噴流の発振機構の過程(iv)に関連して、噴流が発振して生じる卓越周波数 N のエッジ音の音圧レベルを低減化させることである。第4図(c)と第5図(c)は $Ls/w=4$, $a/w=0.2$, $b/w=0.3$ ($NP=49$ に対応)の場合で

第4図 音圧変動波形, $Re=13,300$

ある。この場合には、第4図(b)に比べて、音圧変動波形の振幅は大きくなっている。第4図(d)と第5図(d)は $Ls/w=4$, $a/w=0.2$, $b/w=2.4$ ($NP=6$ に対応)の場合である。音圧変動波形の振幅は第4図(b), (c)に比べて明らかに小さくなっており、第5図の(b)(c)に現れていた $N=215\text{ Hz}$ の卓越周波数は存在しなくなる。第4図(e)と第5図(e)は $Ls/w=4$, $a/w=0.2$, $b/w=7.5$ ($NP=1$ に対応)の場合である。図中の Z_p は突起物の設置位置であり、 $Z_p/h=0$ は y 軸上に突起物を設置した場合を表す(後述の第9図を参照)。この場合、音圧変動波形の振幅は第4図(d)に比べて若干大きくなっているが、第4図(b)に比べると明らかに小さい。また、スペクトルに $N=220\text{ Hz}$ の卓越周波数が現れている。このように、

第5図 音圧変動波形の周波数スペクトル, $Re=13,300$

第6図 SPL と b/w あるいは NP の関係 第7図 SPL_N と b/w あるいは NP の関係 第8図 St_N と b/w あるいは NP の関係

b/w すなわち NP の値により、減音する場合と増音する場合があることがわかった。

$Re=1.33 \times 10^4$, $Ls/w=4$ の場合について、第6図に SPL と b/w すなわち NP の関係を示す。図中の

第9図 SPL と Z_p/h の関係

記号○は $a/w=0.1$ を、記号●は $a/w=0.2$ の場合を表す。また、記号×は突起物を設置しない場合 ($b/w=\infty$ すなわち $NP=0$) である。 $a/w=0.1$ の場合、 $b/w=0.3$ と 0.4 ($NP=49$ と 37 に対応) のときを除いて SPL の値はほぼ一定であり、突起物を設置しない場合の×印の値 (86.5 dB) にほぼ等しい。 $a/w=0.2$ の場合、 $b/w \geq 0.6$ ($b/w=0.6$ は $NP=14$ に対応) では SPL の値は減少しており、減音効果は明らかである。特に、突起物が一対である $NP=1$ ($b/w=7.5$ に対応) の場合においてさえも 7.5 dB の音圧レベルの低下は注目値する。しかし、この場合、第5図(e)のスペクトルにみられるように卓越周波数は存在する。

第7図に SPL_N と b/w すなわち NP の関係を示す。図中の記号×は突起物を設置しない場合である。 $a/w=0.1$ の場合、 $b/w=0.3$ と 0.4 のときを除いて SPL_N の値はほぼ一定であり、突起物を設置しない場合の×印の値 (85 dB) にほぼ等しい。 $a/w=0.2$ の場合、 $b/w=0.3$ と 0.4 のときは $a/w=0.1$ の場合と同様に SPL_N の値は大きくなる。 $b/w \geq 0.6$ では、 $NP=1, 2, 3$ の場合のみ卓越周波数が存在するが、それらの SPL_N の値は×印の値に比べて明らかに小さい。また、 $NP=1, 2, 3$ の場合以外では第5図(d)に示すように、卓越周波数は存在しなくなる。第8図に St_N と b/w すなわち NP の関係を示す。 a/w の値に関係なく St_N の値はほぼ一定であり、突起物を設置しない場合の値 (図中の記号×) にほぼ等しい。

以上で、噴出口に設置した突起物が SPL , SPL_N , St_N に及ぼす影響がわかった。特に、 $NP=1$ の場合においてでさえも減音効果があることは注目値する。そこで、 $NP=1$, $a/w=0.2$ の場合について、突起物の設置位置が SPL , SPL_N , St_N に及ぼす影響を以下調べる。

第9図に SPL と突起物の設置位置 Z_p/h の関係を示す。図中の×印は突起物を設置しないとき ($Z_p/h=$

第10図 SPL_N と Z_p/w の関係 第11図 St_N と Z_p/w の関係

∞) の値である。 Z_p/h の値を小さくすると SPL の値は減少し、 $Z_p/h=0$ のときは 79 dB になる。第10図に SPL_N と Z_p/h の関係を示す。 SPL と同様な傾向が SPL_N の変化にもいえる。第11図に St_N と Z_p/h の関係を示す。 St_N の値はほぼ一定であり、突起物を設置しない場合 (図中の記号×印) にほぼ等しい。

3.2 くさび形物体先端近傍の圧力変動の測定 前節では、噴出口に設置した突起物が SPL , SPL_N , St_N に及ぼす影響を調べた。本節では、突起物の設置により、流れが長辺方向 (z 軸方向) に非一様になることを調べるために、 $NP=0, 1, 2, 3$ の場合について、くさび形物体先端近傍に生じる圧力変動を測定した結果について述べる。突起物を設置することにより SPL , SPL_N の値が小さくなる流れでは、噴流の発振機構の過程 (i) に関連する圧力変動の卓越周波数のスペクトル強度 P_t の値は小さくなるはずである。また、突起物の設置位置下流における P_t の値は突起物の設置していない位置下流の P_t の値とは異なり、小さくなると思われる。

第12図に圧力変動波形とその周波数スペクトルを示す。第12図(a)は噴出口に突起物を設置しない場合である。なお、図中の Z_h はくさび形物体先端近傍

第12図 圧力変動波形と周波数スペクトル, $Re=13,300$, $Ls/w=4$

における圧力変動の測定位置 ($Z_h/h=0$ は噴流軸上) を表す。第12図(b)は $Z_p/h=0$ の位置に一对の突起物を設置した場合 ($NP=1$) について、 $Z_h/h=0$ の位置で圧力変動を測定した結果である。第12図(a)に比べて圧力変動波形の振幅は明らかに小さくなっている。また、スペクトルの卓越周波数のピーク値も小さくなっている。第12図(b)の流れの状態、圧力変動波形の測定位置を噴流軸外の位置 ($Z_h/h=0.2$) にした場合の結果を第12図(c)に示す。圧力変動波形の振幅は第12図(b)に比べると若干大きくなっているが、第12図(a)よりは小さいことがわかる。

$Re=1.33 \times 10^4$, $Ls/w=4$ の場合について、第13図に圧力変動の卓越周波数のスペクトル強度 $P_t/P_{t_{\max}}$ と Z_h/h の関係を示す。ここで、 $P_{t_{\max}}$ はスペクトル

第13図 $P_t/P_{t_{\max}}$ と Z_h/w の関係 第15図 St_N と Ls/w の関係 第14図 SPL と Ls/w の関係

強度の最大値であり、 $NP=0$ のときの $Z_h/h=0$ の位置で測定したスペクトル強度である。図中の記号 $\times$ 、 $\circ$ 、 Δ 、 $\square$ は $NP=0, 1, 2, 3$ の場合をそれぞれ表す。 $P_t/P_{t_{\max}}$ の値は NP の増加とともに全体的に小さくなる。 $\circ$ 印の $NP=1$ の場合、突起物設置位置($Z_p/h=0$)の下流位置付近($Z_h/h=0$ 付近)における $P_t/P_{t_{\max}}$ 値は減少しており、この付近で $P_t/P_{t_{\max}}$ の値は極小値をもつ。 $NP=2, 3$ の場合も同様であり、 Δ 印の $NP=2$ の場合、突起物設置位置($Z_p/h=\pm 0.17$)の下流位置付近($Z_h/h=\pm 0.17$ 付近)で $P_t/P_{t_{\max}}$ の値は極小値をもつ。また、 $NP=3$ の場合においても、突起物設置位置 $Z_p/h=0, \pm 0.25$ に対応した下流位置 $Z_h/h=0, \pm 0.25$ で $P_t/P_{t_{\max}}$ の値は極小値をもつ。このように、突起物の設置位置下流における P_t の値は突起物を設置していない位置下流の P_t の値より小さくなり、流れは長辺方向に非一様になっていることがわかった。今後の課題として、可視化法により、噴出

口に設置した突起物がせん断層に形成される渦の挙動に及ぼす影響など、突起物の設置と噴流発振の流れの模様の関係を明らかにすることである。

3.3 SPL, St_N と Ls/w の関係 第14図にSPLと Ls/w の関係を示す。突起物を設置しない場合(記号 $\bullet$)、SPLの値は Ls/w とともに増加し、 $Ls/w=3\sim 4$ 付近で最大値に達した後、減少している。この傾向は、白浜ら¹⁶⁾、望月ら¹¹⁾の実験結果と同じである。 $NP=49$ の場合(記号 $\circ$)、測定した Ls/w の全範囲にわたってSPLの値は突起物を設置しない場合の値より大きい。一方、 $NP=6$ と1の場合(記号 Δ と $\square$)には、突起物を設置しない場合の値より小さい。第15図に St_N と Ls/w の関係を示す。突起物を設置しない場合(記号 $\bullet$)、 St_N の値は Ls/w が増加すると減少している。この傾向は、従来の実験結果と同じである^{9,16,17)}。突起物を設置した場合で卓越周波数が認められる場合、 Ls/w に対する St_N の変化の傾向は突起物を設置しない場合と同じ傾向を示す。以上で、実験した Ls/w の全範囲にわたって、突起物の設置によりエッジ音の制御が可能であることがわかった。

4. 結 論

噴流・くさび形物体系流れにおいて、噴出口に三角形形状の突起物を設置することにより、エッジ音の制御を試みた。得られた結果は以下の通りである。

1) 噴出口に突起物を設置することにより、エッジ音が制御されることがわかった。

2) $0.3 \leq b/w \leq 7.5$ の実験範囲において($b/w=0.3$ は $NP=49$, $b/w=7.5$ は $NP=1$ に対応), $a/w=0.1$

の場合は減音効果はない。 $a/w=0.2$ のとき、 $b/w \geq 0.6$ ($b/w=0.6$ は $NP=14$ に対応) では減音効果は顕著であり、SPLの値は約10 dBほど低下する。特に、 $NP=1$ の場合においてさえも減音効果があることは注目に値する。しかし、 $a/w=0.1, 0.2$ で $b/w=0.3, 0.4$ のとき、SPLの値は約4 dBほど上昇する。

3) $NP=1$ の場合について、突起物の設置位置 Z_p/h がSPL, SPL_N に及ぼす影響がわかった。 Z_p/h の値を小さくするとSPL, SPL_N の値は減少する。特に、 $Z_p/h=0$ のとき、SPLの値は約7 dBほど低下する。

4) 突起物の設置により、流れが長辺方向 (z 軸方向) に非一様になることを調べるために、 $NP=0, 1, 2, 3$ の場合について、くさび形物体先端近傍の圧力変動の卓越周波数のスペクトル強度 $P_t/P_{t_{\max}}$ と圧力変動の測定位置 (Z_h/h) の関係を調べた。 $P_t/P_{t_{\max}}$ の値は NP の増加とともに全体的に小さくなる。また、突起物の設置位置下流に対応した位置で、 $P_t/P_{t_{\max}}$ の値は極小値をもつ。

5) くさび距離 Ls/w を変化させた場合においても、突起物の設置によりエッジ音の制御が可能であることがわかった。

最後に、実験に協力いただいた信州大学学生、深見清澄君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Curle, N.: The Mechanics of Edge-Tones, Proc. Roy. Soc. London, A, **216** (1953), pp. 412-424.
- 2) Woolley, J. P. and Karamcheti, K.: Role of Jet Stability in Edgetone Generation, AIAA J., **12** (1974), pp. 1457-1458.
- 3) Powell, A.: On the Edgetone, J. Acoust. Soc. Am., **33** (1961), pp. 395-409.
- 4) Naborg, W. L.: Self-Maintained Oscillation of the Jet in a Jet-Edge System, J. Acoust. Soc. Am., **26** (1953), pp. 174-182.
- 5) Rockwell, D. O.: Transverse Oscillations of a Jet in a Jet-Splitter System, Trans. ASME, Ser. D, **94** (1972), pp. 675-681.
- 6) Brackenridge, J. B.: Transverse Oscillations of a Liquid Jet, J. Acoust. Soc. Am., **32** (1960), pp. 1239-1242.
- 7) Lucas, M. and Rockwell, D. O.: Self-Excited Jet: Upstream Modulation and Multiple Frequencies, J. Fluid Mech., **147** (1984), pp. 333-352.
- 8) Kaykayoglu, R. and Rockwell, D. O.: Unstable Jet-Edge Interaction. Part 1. Instantaneous Pressure Fields at a Single Frequency, J. Fluid Mech., **169** (1986), pp. 125-149.
- 9) 社河内敏彦, 伊藤忠哉, 末松良一, 四阿佳昭: 噴流・エッジ系における噴流の発振現象 (第1報, 噴流の挙動と発振周波数), 日本機械学会論文集 (B編), **51** (1985), pp. 2897-2908.
- 10) 堀越長次, 池田敏彦, 浅野一郎: セン断層にうずをともなう長方形噴流の発振に関する研究, 日本機械学会論文集 (B編), **52** (1986), pp. 1191-1196.
- 11) 望月 修, 山田日出夫, 山辺春雄: 二次元噴流中のくさび形物体まわりの流れ, 日本機械学会論文集 (B編), **51** (1985), pp. 2258-2264.
- 12) Rockwell, D. O. and Naudascher, E.: Self-Sustained Oscillations of Impinging Free Shear Layers, Ann. Rev. Fluid Mech., **11** (1979), pp. 67-94.
- 13) 望月 修, 木谷 勝, 新宮啓介: 空力的自励音の発生機構とその低減, 日本機械学会論文集 (B編), **56** (1990), pp. 2403-2408.
- 14) Mochizuki, O., Kiya, M. and Tazumi, M.: Vortex-Body Interaction in a Jet-Circular Cylinder Sound Generation System, Fluid Dynamics Research, **3** (1988), pp. 363-368.
- 15) 朴 晋佑, 望月 修, 木谷 勝: 衝突噴流によって発生する空力音と渦構造 (物体からはく離する渦の影響), 日本機械学会論文集 (B編), **59** (1993), pp. 2756-2761.
- 16) 白浜芳朗, 朴 晋佑, 木谷 勝: 噴流-円柱発振系の制御, 日本機械学会論文集 (B編), **57** (1991), pp. 3402-3407.
- 17) 佐野 学, 水牧祥一: 長方形噴流の発振機構に関する実験的考察, 日本機械学会論文集 (B編), **54** (1988), pp. 791-797.
- 18) 池田敏彦, 土屋良明, 長澤忠延, 堀越長次: 発振噴流の制御に関する可視化研究, 可視化情報, **15** (1995), pp. 183-189.
- 19) 池田敏彦, 桑名輝明, 土屋良明, 長澤忠延, 堀越長次: エッジ音の低減化に関する一考察, 日本機械学会論文集 (B編), **62** (1996), pp. 1841-1846.
- 20) 丸田芳幸: 極低騒音風洞の開発, 日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文(III), No. 940-10, 1994, pp. 166-168.