多孔管を用いた消音器に関する研究*

(第1報, 基本的特性および最適長さに関する実験)

瀬戸 邦聰**, 松岡 宗治**, 前田 徹***

Study of Porous Tubes as a Noise Suppressor (1st Report, Experiments on Fundamental Characteristics and Optimal Length)

Kunisato SETO, Muneharu MATSUOKA, and Tohru MAEDA

Sound-reducing and a flow-accelerating effect due to the attachment of a porous tube to an underexpanded nozzle was experimentally investigated and the most suitable length of the porous tube as a noise suppressor was examined. In the present experiment, the porous tube had the same diameter as the standard nozzle to which it was attached and also the porous pattern was fixed. The measurement of mean flow and turbulence of the jets from the porous surface of the tube was carried out as well as the measurement of sound and exit Mach number. The ratio of the jet pressure ratio to the atmosphere was mainly 3 and 4.5. It was demonstrated by the present experiment that the flow at the exit of the porous tube changes from underexpansion to correct or over expansion by its elongation and that there exists a kind of optimal length to suppress the jet screech according to its pressure ratio.

Key Words: Noise Suppressor, Porous Tube, Compressible Flow, Underexpanded Jet, Flow Acceleration, Optimal Length

1. 緒 言

大気圧に対する集合胴圧(よどみ圧)の比がある値(臨界値)を越えると,流れはノズルのど部でチョークし,噴流は不足膨張噴流となり,独特の周期的構造をもつ衝撃波を形成しスクリーチによる騒音をもたらす^{(1)~(5)}。このような不足膨張状態は高空を飛行するジェット機やロケット機のエンジン排気部の流れから清掃用のエアダスタ等各種のノズルを経た流れに至るまで身近に見られる噴流の状態である。不足膨張状態の流れに多孔管を使用すれば,多孔管壁からの噴出により流れが膨張加速し管出口において適正膨張に近い状態が得られ,スクリーチを発生しないで済む。スクリーチの除去法やダクトノイズの消去のために多孔壁を使用する方法についてはすでにいくつかの報告があるが^{(6)~(12)},不足膨張状態の流れが多孔管を通過する際の多孔壁からの噴出を伴う流れの機構およびその音響特性を系統的に調べた研究は見当たらない。そこで本研究では,上述の原理による消音器の開発の第一歩として,多孔管を通過する不足膨張流れの基本的特性

および消音器としての効果をもたらすに必要な多孔管の長さについて実験的に調べた結果を報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 多孔管の仕様 管の形状, 孔径, 孔配置および管長の組合せでいろいろな多孔管が考えられるが基本的形状としてノズル出口径(D)と内径が等しい直管の側面を円周方向に18等分するような平行直線上に直径 $D/10$ の孔を $D/5$ 間隔で穿孔したものを使用した(図1)。長さ L として $L/D=1, 2.5, 3.5, 5, 7.5$ および10を選んだ。管表面積に対する孔の空けき率(Poros-

図1 多孔管の取付けおよび流動計測点の説明図

* 昭和61年10月7日 第64期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和61年4月28日。

** 正員, 佐賀大学理工学部(〒840 佐賀市本庄町一)。

*** 学生員, 佐賀大学理工学部。

ity) は $L/D=1$ の場合が 0.20 でほかはすべて 0.22 であった。 $L/D=3.5$ については音響計測のみを行った。

2.2 基本ノズル 基本ノズルの仕様を図 2 に示す。単位は mm である。これらのノズルのピーク周波数およびその強さを測定した。

2.3 実験条件の選定 上記基本ノズルの中、本論文では先細角 (θ_N) = 30° の場合について報告する。一般的に先細ノズルでは、圧力比を 1 からしだいに増加するとノズル出口部で音速、ノズル外部で超音速となる噴流が得られ、音速線は圧力比の増加によりしだいにノズル出口に近づき、ある圧力比以上では音速線の形状は一定となる。この意味での臨界圧力比は先細角 30° のノズルでは約 4.4 である⁽¹³⁾。そこで圧力比についてはこの臨界値以下の値として 3、またそれをわずかに越える値として 4.5 を選んで音響特性および多孔管壁から噴出する流れの特性を調べた。基本的には、他の先細角のノズルや他の圧力比についても同様の結果が得られると考えられる。

2.4 出口マッハ数の計測 多孔管の出口から噴出する流れの状態を把握するために、その出口面におけるマッハ数を計測し、ノズルのみの場合との比較を行った。計測点 (r) は出口面の中心点 ($r/D=0$) と出口面積を二等分する円周上の一点 (偏心点, $r/D=0.35$) の合計二点とし、直径 0.7 mm の注射針を利用したピトー管によって総圧および静圧を測定した。これらの測定結果から、流れが超音速の場合はレイリーのピトー管公式をまた亜音速の場合は等エントロピの関係式を用いてマッハ数を算定した。圧力比は 1 から 0.5 刻みで 5 まで変化させた。

θ_N°	a	b	c	d	e	D
0	1	40	70	110	20	40
5	2	114.3	68	114.3	20	40
10	3	56.7	70	110	20	40
15	2.9	37	70	110	20	40
30	1.3	26	70	110	10	62
45	1.4	15	70	110	10	30
60	1.25	10.1	70	110	5	25
75	1.3	4.7	70	110	5	96
90	0	0	70	105	5	96

図 2 基本ノズルの仕様

2.5 音響特性の計測

2.5.1 測定室の音響特性および測定点 測定室の平面図形および音響特性を図 3 に示す。測定室の高さは 2 m であり壁を多孔ベニヤ板でおおひ内部に石綿を使用した。ノズル中心軸上に $I=100$ mm とし I , $2I$, $4I$, $8I$ および $16I$ における音圧レベル ($[L_p]_L$; 添字 L は linear 値を意味する) の減少量から I および $16I$ で壁面の影響があることがわかった。そこで測定点をノズル (または多孔管) 出口面内の平面でノズル軸から $50D$ 離れた点 (測定点 A) およびノズル出口面から $50D$ の距離の平面内で同じく軸から $50D$ 離れた点 (測定点 B) に設け、測定点 B においてはマイクロホンの方向をノズル (または多孔管) 出口に向け (B1) または中心軸に直角に向けて (B2) 測定した (図 4)。A, B1 および B2 における測定値の比較の一例を図 5 に示す。これは $L/D=5$ の多孔管を用いて圧力比 4.5 の条件で測定した 1/3 オクターブ分析結果でありオーバーオール値 (O. A.) に対する音圧レベル ($[L_p]_L$) は B1 点で最も高く A 点で最も低い値を示した。

2.5.2 音響計測 コンデンサマイクロホン (B & K 4131 および 4133) および増幅器 (B & K 2607) を使用しその解析には高速度レベルレコーダ (B & K 2305) およびスペクトラムアナライザ (TR-9305 A) を使用した。

2.6 多孔管壁面から噴出する流れの計測 多孔管内部の流れの推察と消音効果をよりよく理解するために多孔管側面の孔から噴出する流れの平均流速と流れを計測した。測定には熱線風速計 (カノマックス 21-1312, 1211, 1711) を使用し多孔管表面から孔径の 2 倍 (2 mm) の点でプローブを移動させ、熱線風速計から取り出した出力を前述のスペクトラムアナライザに

POINT	$[L_p]_L$ (dB)	DECREASE (dB)
I	105.2	4.2 5.0 5.2 3.8
2I	101.0	
4I	96.0	
8I	90.8	
16I	87.0	

図 3 測定室の音響特性

入力して周波数分析を行った。

2・7 シュリーレン観測 噴流の様子を観察するため、瞬間マグネシウム光源(閃光時間約2 μ s)によるシュリーレン観測を行った。

3. 実験結果

3・1 基本ノズルの音響特性 圧力比の変化に対してスクリーチ周波数およびその強さが不連続的に変化することがすでに報告されているが⁽¹⁾この現象は著者らの実験でも観察された。さらにノズル出口径および先細角が異なるとスクリーチ周波数およびその強さも異なることがわかった。表1は圧力比3の場合の各ノズルのスクリーチ周波数、スペクトルレベル($L_{ps,peak}$)および $[L_p]_L$ を示す。著者らはスクリーチが急変する際のスペクトル解析により、その際のスペクトルのピーク近傍に別のピークが出現し、圧力比を高くするとそれらのピークの周波数はほとんど変化せず高周波側のピークの高さがしだいに減少し逆に低周波側のピークの高さが上昇していき、ついには低周波側のピークだけが残る現象を観測した。さらに圧力比を高めるとピーク周波数は連続的に減少するがやがてまた別のピークが現れ同じ現象を繰返すことがわかった。

3・2 出口マッハ数 図6(a)はノズル出口面中心点、図6(b)は同偏心点のマッハ数(M)の圧力比(P_0/P_a)に対する変化を示す。 $L/D=0$ はノズルのみの場合また破線は等エントロピ膨張をした場合を表す。不足膨張状態の場合多孔管壁面上の空けきが気体の膨張を助ける効果が期待されるがどの程度の加速が得られるかは興味あるところである。測定結果を見ると①ノズルのみの場合の出口面におけるマッハ数はすべての圧力比で1以下であるのに対し、多孔管を取付けた

場合は1以上となり、出口マッハ数の増加が確認された。②偏心点のほうが中心点より出口マッハ数が高く偏心点ではほぼ等エントロピ膨張した場合に相当する出口マッハ数を与える。③圧力比3以下では L/D を1以上にしても加速の程度に変化はないが圧力比を高めると、より長い多孔管のほうが大きなマッハ数を与えるようになる。④中心点の出口マッハ数の測定値は衝撃波の影響と見られるばらつきが見られた。

3・3 音響特性 図7は L/D の変化に対する $[L_p]_L$ を示す。これらの測定結果から、圧力比3では $L/D=1$ でもかなりの消音効果があり、 $L/D=3.5$ までは L/D が大なるほど消音効果は漸増するが、それ以上での効果の増大はわずかである。圧力比が4.5と大きくなると $L/D=1$ ではほとんど消音効果は見られず $L/D=2.5$ でかなりの消音効果があり、やはり $L/D=3.5$ まで L/D の増大につれ消音効果も漸増しそれ以上では微増となる。スペクトル解析結果を見ると圧力比3で $L/D=1$ の時、圧力比4.5では $L/D \leq 2.5$ でノ

表1 基本ノズルの音響特性

θ_N deg	D mm	peak Hz	Lps.peak dB	$[L_p]_L$ dB
0	20	6300	119	130
5	20	6400	119	129
10	20	8250	116	129
15	20	8400	121	129
30	10	16900	121	126
45	10	15000	120	126
60	5	14350	94	112
75	5	15200	92	111
90	5	15150	94	112

図4 マイクロホンの位置および方向

図5 測定位置による音圧レベルの変化

(a) 中心点 ($r/D=0$)

(b) 偏心点 ($r/D=0.35$)

図 6 多孔管長による出口マッハ数の変化

図 7 多孔管長による音圧レベルの変化

$L/D=10, P_0/P_a=4.5$

図 9 多孔管壁面からの流れの乱流スペクトル

図 8 多孔管壁面からの流れの平均流速分布

ズルのみの場合と同様なピークが観察されスクリーチが消失していないことを示した。一般にスクリーチが発生している場合に L_p の上昇が見られた。

3.4 多孔管壁面から噴出する流れの平均流速分布
多孔管取付け面から孔までの距離を X とする。図 8 に見られるように圧力比 3 および 4.5 の場合とも、 $X/D < 3$ では X/D の増加につれ、平均噴出速度 ($\bar{U}$) は局所的には増減の変動を繰返しながら全体的には急激に減少する。 $X/D \geq 3$ ではほぼ一定の割合で漸減する。

L/D の増加につれ上流点である多孔管取付け面近傍の孔からの噴出速度はわずかながら高くまた多孔管出口面近傍の孔からのそれはわずかながら低くなった。この傾向は圧力比の高い場合のほうがより明確に示された。とくに $L/D=10$ の場合、多孔管出口面に近い孔で急激な噴出速度の低下が観測された。

3.5 多孔管壁面から噴出する流れの乱流特性

多孔管壁面からの流れの乱流特性は全体として平坦な特性を持つことが、図9の圧力比4.5, $L/D=10$ の場合のスペクトルからも窺える。単位は1Vに対する出力電圧変動の実効値($\sqrt{v^2}$)のdB値である。しかし圧力比3で $L/D=1$, 圧力比4.5では $L/D=2.5$ の多孔管に至るまで多孔管出口面に最も近い孔から噴出する流れの乱れにスクリーチと周波数の等しいピークが存在した〔図10(a)~(d)〕。なお乱流百分率は10%程度であり平均速度の増加につれ減少する傾向が見られた。

3.6 シュリーレン写真 図11(a)~(f)に各長さの多孔管を取付けた場合のシュリーレン写真を示す。圧力比は4.5とする。 $L/D=1$ の場合多孔管なしの場合と同様に明確なショック・セル構造が観察される。また多孔管を経た流れは、多数の弱い衝撃波を含むがその強さは管長が長いほど弱まることがわかる。また $L/D=10$ の場合には多孔管出口から明確な衝撃波が発生しており、境界流線も流れ方向に狭まり過膨張流れに近いことを示している。一方 $L/D=5$ の場合、弱い衝撃波のほか、強い衝撃波は観測されず、噴流境界のふくらみも見られぬことから適正膨張に近い状態にあるといえる。圧力比3の場合もほぼ同様のことが観測された。

4. 結果の考察および検討

基本ノズルのみの場合の圧力比の変化によるスクリーチ周波数の変化は乱流のLarge Scale構造に関連しており、スクリーチの強さあるいは周波数の不連続的变化が起こる際は少なくとも2種のLarge Scale

構造の存在を示すものと考えられる。このようなスクリーチは十分な長さの多孔管を取付けることによりショック・セル構造とともに消失し、圧力比3で $[L_p]_L$ 値が約12 dB, 4.5で約13 dB相当の消音効果をもたらすことが確認された。また同時に多孔管を取付けることにより出口マッハ数の増加が見られとくに偏心点において圧力比3.5くらいまでは等エントロピ膨張とほぼ同様な加速が得られた。もし同様な等エントロピ膨張が得られるとすれば流量の損失は等エントロピ膨張した場合の断面積に対する多孔管断面積の比で推察されこの点から考慮すると圧力比3および4.5とも多孔管を取付けたほうが推力も増加すると考えられる。さらに外部に逃げた流れをカバー等の取付けにより補えば推力についても十分な増加が見込まれる。多孔管の最適長さを決定するに当たって、 $L/D \geq 5$ ではそれほど消音効果の増大が見られぬことや $L/D=5$ で適正膨張に近い流れが得られることから、圧力比4.5くらいまでは $L/D=5$ が最適であると考えられる。さらに多孔管壁から噴出する流れの平均速度の変化を見ると $X/D \geq 3$ で安定した変化があることから、これと L/D に対する L_p の変化に相関があると予想される。 $L/D=3.5$ の多孔管を追加して音響測定をしたのはこのことを確認するためであり実際 $L/D \geq 5$ の場合とほぼ同様な L_p 値を示した。このようにして多孔管の最適長さを決定する上で孔からの噴流の時間平均流速の変化が重要な目安となることがわかった。なお最後に乱流と音響スペクトルとの比較からスクリーチに関与する乱れは管出口面だけに限られ管上流への音響作用はあまりないと推察される。

図10 音響および乱流スペクトル

図11 多孔管から噴出する流れ ($P_0/P_a=4.5$)

5. 結 論

不足膨張状態にあるノズルに多孔管を取付けることにより以下の効果があることが本実験で明らかになった。

(1) 多孔管を取付けスクリーチを除去することにより圧力比3~4.5の場合に約13 dBの消音効果が得られる。

(2) 多孔管の取付けにより多孔管出口面では等エントロピ膨張に近い加速が得られる。

(3) 消音効果を得る上で多孔管の長さは長いほどよいが、ある長さ以上では長くした効果があまりないという意味で最適長さが存在する。最適長さの多孔管出口面では適正膨張に近い流れとなる。また多孔管取付け面からの距離(X/D)が最適長さ以上の点にある孔から噴出する流れの平均速度の変化はそれより上流の点のそれに比べて明確に小さくなる。

(4) 今回の実験条件では最適長さは3.5~5であ

る。

本実験の協力を得た瓜生、福島、金子、井上の諸君に対して感謝の意を表す。

文 献

- (1) Powell, A., *Aeronaut. Q.*, 4 (1953), 103.
- (2) Powell, A., *Proc. Phys. Soc.*, B66 (1953), 1039.
- (3) Hammitt, A. G., *J. Aerospace Sci.*, 28-9 (1961), 673.
- (4) 光安・瀬戸, 日本航空宇宙学会誌, 19-209 (昭46), 227.
- (5) Seiner, J. M., *AIAA-84-2275, AIAA/NASA 9th Aer. oacoustics Conference*, (1984).
- (6) Powell, A., *Proc. Phys. Soc.*, B67 (1954), 313.
- (7) Morris, P. J., Richarz, W. and Ribner, H. S., *J. Sound Vib.*, 29-4 (1973), 443.
- (8) Bohn, A. J., *AIAA Paper*, No. 76-80 (1976).
- (9) Denham, J. W., Jr., *AIAA-83-0646*, (1983).
- (10) Kibens, V. and Wlezien, R. W., *AIAA-83-0774*, (1983).
- (11) Yamamoto, K., Brausch, J. F., Balsa, T. F., Janardan, B. A. and Knott, P. R., *NASA Contractor Rep.*, 3845 (1984).
- (12) Stone J. R., *NASA Tech. Memo.*, 83799 (1984).
- (13) 瀬戸・林, 日本航空宇宙学会誌, 30-34 (昭57), 329.