多孔管を用いた消音器に関する研究*

(第2報, 空げき率の影響およびシュラウドの効果に関する実験)

瀬戸 邦 聰^{*1}, 松岡 宗 治^{*1}

Study of Porous Tubes as a Noise Suppressor (2nd Report, Experimental Study on the Effects of the Shroud and Other Parameters)

Kunisato SETO and Muneharu MATSUOKA

In order to increase the noise-reducing effect of a porous tube, we investigated the change in the acoustic characteristics due to the variation of porosity, the diameter of the aperture and the porous pattern of the tube. We found that the noise-reducing characteristics are changed by the attachment of a shroud to each porous tube especially in the range of low pressure ratios. We showed the preferable combination of a porous tube and shroud to effectively reduce the noise level for a variety of pressure ratios. Furthermore, we discovered experimentally that the combination of a shroud and porous tube can increase the thrust (momentum) of the jet flow through it, especially in the range of higher pressure ratios.

Key Words: Noise Suppressor, Porous Tube, Compressible Flow, Underexpanded Jet, Porosity, Shroud

1. 緒 言

気体中に圧力差があれば, その差は気体粒子の移動をひきおこす。その過程で, 気体粒子の平均速度が増加し, 圧力差が運動エネルギーの増加へと置き換えられる。しかし実在気体では, この圧力差による仕事量が気体粒子の運動エネルギーに速やかには変化せず, 一部は熱運動や振動などの分子かくはんのエネルギーに変化しエントロピーを増加させる。この現象は, ノズルから噴出する噴流についても同様であり, 特に不足膨張ノズルでは, エントロピー変化をもたらす衝撃波を含む噴流構造となりスクリーチを伴う騒音を発生する⁽¹⁾⁽²⁾。著者らは前報⁽³⁾で不足膨張状態のノズルに多孔管を取付けることにより, 流れの加速と騒音の軽減をもたらすことを指摘し, 空げき率を一定にして管長を変化させた場合の特性を詳細に調べ, 消音器としての最適長さの存在を明示した。本報では, 消音効果をいっそう高めるため, 空げき率, 孔直径, 孔パターンを変化させた場合の特性の変化を調べ, さらに各多孔管に有孔, 無孔のシュラウドを取付けた場合の実験を

行い, 各圧力比において好ましい多孔管とシュラウドとの組合せについて新たな知見を得たので報告する。

2. 記 号

本論文で用いた主な記号は, 次のとおりである。

A(1, L): 孔直径1 mm, 格子状孔パターン空げき率0.225の多孔管

A(1, Z): 孔直径1 mm, 千鳥状孔パターン空げき率0.225の多孔管

B(1, Z): 孔直径1 mm, 千鳥状孔パターン空げき率0.441の多孔管

B(2, Z): 孔直径2 mm, 千鳥状孔パターン空げき率0.432の多孔管

S□: シュラウドを表し, □内に内径を記入

PS□: シュラウドに孔を格子状にせん孔したものを表し□内に内径を記入, 多孔シュラウド

3. 実験装置および方法

3・1 実験装置配管系 往復式空気圧縮機 (IWATA CT 350 CX 2) で圧送された空気は, エアークリーニングセパレータ (IWATA ACS-220) 冷凍式エアードライア (IWATA RD 370) で清浄な乾燥空気と

* 昭和63年3月18日 関西支部第63期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和62年11月9日。

^{*1} 正員, 佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町)。

なり、エアータンクに貯気後、バルブの開度調節により、所定の集合胴圧 P_0 に保ち、ノズル、多孔管（シュラウドを含む）を経て、測定室（大気圧： P_a ）へ噴出した。

3.2 多孔管およびシュラウドの仕様 本論文では、多孔管およびシュラウドの長さを 50 mm に固定し、孔径を 1 mm および 2 mm の 2 種、空けき率を約 0.2 と約 0.4 の 2 種、孔パターンを格子状と千鳥状の 2 種に限って調べた。格子状は、孔が管軸方向とそれに直交する 2 組の平行線群上に位置する場合であり、千鳥状は格子状 4 点の中心にさらに 1 点配置した形状をとる。図 1 は多孔管にシュラウドを取付けた場合と A(1, L) および B(2, Z) の孔パターンを示している。多孔管内径 D に対するシュラウド内径の比（径比）は、1.2, 1.4, 1.5, 1.7, 2.0 および 2.5 の 6 種類である。多孔（有孔）シュラウドは、1 mm 径の孔を格子状に空けき率約 20 % であけたものである。

3.3 基本ノズル 基本ノズルは前報で使用したものと同じく先細角 30° の円すいノズルである。

3.4 実験方法 基本ノズル、4 種類の多孔管、6 種類のシュラウドおよび 3 種類の多孔（有孔）シュラ

ウドを組合せコンデンサマイクロホン（B&K）、スペクトラムアナライザ（TAKEDA）を用いた音響計測、ピトー管による流れ場の測定およびシュリーレン観測を行った。圧力比の範囲は 1 から 5 までであり、0.1 刻みで主に加圧する方向に変化させ調圧した。また推力測定のため一つの中心円および $0.1 D$ 刻みの幅を持つ同心円で囲まれた輪形を 4 等分した領域の代表点のマッハ数を測定した。すなわち推力（THRUST）は

$$\text{THRUST} = \sum_{i=1}^n \rho_i u_i^2 \Delta A_i \dots \dots \dots (1)$$

により計算した。ただし、 ρ_i は密度、 u_i は軸方向速度、 ΔA_i は分割した面積要素、 n は、分割数である。ピトー管によるマッハ数 M の計測には、レイリーのピトー管公式を利用した。音響計測のためのマイクロホンの位置は図 2 の 5 点（C1, C2, C3, C4, C5）である。各測定点においてデータの差が生じるが、多孔管の音響特性を比較するうえで、定性的な違いがないことを確認したうえで、特性の差が明りょうな C1 点のデータを用いた。音場の噴流軸周りの測定点による差は認められなかった。音圧レベルは Linear 値であり、高周波の発生がない場合、周波数帯、22.5 Hz～20 kHz で、それ以上の高周波数の発生がある場合は 22.5～100 kHz の範囲で測定した。

4. 実験結果

4.1 圧力比の分類 多孔管の出口マッハ数 M は、圧力比（ P_0/P_a ）により、（1）亜音速領域、（2）圧力比の増加につれ軸上マッハ数が単調に増加する超音速領域、（3）軸上マッハ数が圧力比の増加に対して飽和してしまう領域、に分類できる〔後出図 10(a) または前報参照のこと〕。（1）を低圧域、（2）を中圧域、（3）を高圧域と呼ぶことにする。

例えば A(1, L) ではその値は次のとおりである。

1.0 < (低圧域) < 2.2

2.2 ≤ (中圧域) < 3.5

3.5 ≤ (高圧域)

4.2 音響計測結果 基本ノズル、A(1, L), A(1, Z), B(1, Z), B(2, Z) の C1 点における計測結果を図 3 に示す。音圧レベル (L_p)_L は Linear 値を意味する。全体的に A 形多孔管が音圧レベルが低く、高圧域で B 形多孔管がやや消音効果がよかった。B 形では低圧域でマッハ数のべき法則に従わない余剰騒音の発生が見られた。A 形多孔管のノズルに対する消音効果は低圧域ではわずかであったが、圧力比 3 では 24 dB、圧力比 4 では 32 dB の消音効果が見られた。なお以下の図は、主に加圧方向の調圧に対する変化を示している

(a) シュラウド取付図

(b) 格子状パターン (c) 千鳥状パターン

図 1 多孔管およびシュラウド

図 2 音響測定点

が、音圧レベルの急変が起こる場合、圧力比に対する履歴現象があった。この場合は、減圧方向の変化も調べ、加圧方向を実線で、減圧方向を破線で示した。B(2, Z) にその急変と履歴現象があった。

各多孔管に無孔あるいは有孔のシュラウドを取付けたときの音圧レベルを図4～6に示す。図4(a)に示すとおり、A(1, L) にシュラウドを取付けると、低圧域で音圧レベルが下がっているが、中、高圧域では目立った変化はなかった。ただ径比1.2のシュラウドを取付けた場合、低圧域で消音効果が増すかわりに高圧域では消音効果は損われた。また図4(b)に示すとおりA(1, L) に有孔シュラウドを取付けた場合音響特性の変化はほとんどなかった。

図5(a)に示すとおりB(1, Z) に径比1.5以上のシュラウドを取付けると、低圧域で音圧レベルが一部上昇したが有孔シュラウドの取付けの場合〔図5(b)〕

では、中圧域を中心に音圧レベルは減少した。B(1, Z) +PS15 の場合その効果が比較的顕著であった。径比1.2のシュラウド取付けにより音響特性は基本ノズルの状態に近づいたが、圧力比に対する音圧レベルの急変は取り除かれた。

図6(a)および図6(b)に示すとおりB(2, Z) にシ

図3 多孔管およびノズルの音圧レベル

(b) 有孔シュラウド

図5 シュラウド付B(1, Z)の音圧レベル

(a) 無孔シュラウド

(a) 無孔シュラウド

(b) 有孔シュラウド

図4 シュラウド付A(1, L)の音圧レベル

(b) 有孔シュラウド

図6 シュラウド付B(2, Z)の音圧レベルの変化

シュラウドを取付けると、ごく低圧域で音圧レベルが増大した。これは約1 kHzの共鳴音の発生によるものであり、笛吹きと同じ現象であった。ピークの発生により音圧レベルは高くなっているが、ピーク以外ではそのスペクトルのレベルは低くなっていた。その他の圧力比では、余剰騒音の発生がなく低圧域での消音効果の改善があった。特にB(2, Z)+PS15では笛吹き現象もあまりなく、消音器として有効であった。高圧域では、シュラウドなしのほうが消音効果は大であった。

図7に、シュラウドのみを取付けた、いわゆる、急拡大管の音圧レベルを測定した結果を示す。これについては、すでに報告があるが^{(4)~(6)}、今回の圧力比の範囲内の実験では、S15, S20およびPS15にB(2, Z)の場合と類似の圧力比の変化に対する音圧レベルの急変現象が見られた。また、S20およびPS15で急変時の履歴現象が観察された。有孔シュラウドのみの音圧レベルは、A(1, L)などに比べて高圧域のPS15のほかはすべて高かった。

4.3 音響スペクトルおよびシュリーレン観測
A(1, L)多孔管では強いピークはなく、スペクトルは平坦で、シュリーレン写真にも特記する特徴はなかった。一方、B(1, Z)の圧力比2.0のスペクトルには約16 kHzの強いピークがあり〔図8(a)〕、シュリーレン写真にも密度変化のしま模様が見られた〔図9(a)〕。圧力比を2.5に高めると、上記ピークは消滅し〔図8(b)〕、音圧レベルは減少し、シュリーレン写真には、X形衝撃波が観察されしま模様が若干弱まった〔図9(b)〕。さらに圧力比を増すと、音響特性は、衝撃波構造に支配されるものになった。B(2, Z)の場合、圧力比2.0では、10 kHz近傍にピークが見られたが〔図8(c)〕、圧力比をわずかに増加すると約10 kHzのピークは消滅し、音圧レベルは減少した〔図8(d)〕。また60~70 kHzに複数個のピークが観察された。流れは図9(c)から図9(d)のようにしまの間隔が長かつしまの密度変化が弱くなった。

圧力比3.0では、高周波域約70~80 kHzに複数個

図7 シュラウドのみの音圧レベル

のピークがあった〔図8(e)〕。このときのシュリーレン写真には音波が観察され〔図9(e)〕、その波長はB(2, Z)の孔間隔と一致した。

4.4 出口マッハ数および推力の測定 A(1, L)に各種シュラウドを取付けた場合の出口マッハ数 M および排気ガスの工学的利用価値のパラメータの一つとして推力 (THRUST) を測定した。マッハ数の測定値は、同心円4点の平均値である。シュラウドの取付けにより出口マッハ数は減少し〔図10(a), (b)〕、推力は増加した。その効果は径比が小さく圧力比が大きいくほど大きかった (図11)。

5. 実験結果の考察および検討

今回の実験結果から、多孔壁の孔径、孔パターンおよび空けき率の影響とシュラウドの効果を考察する。A(1, L)とA(1, Z)の実験結果が定量的にも一致したこと、またB(1, Z)とB(2, Z)が定性的に同じ特性を持ったことから、管軸上同一点の横断面を含む多孔壁表面要素の空けき率が等しければ、多孔管の音響および空力特性はほぼ等しいと考えられる。しかし同じ空けき率でも孔径が小さいB(1, Z)のほうがB(2, Z)より圧力比に対する音圧レベルの変化が連続的であった。後者ではじょう乱と流れの不均一が考えられる。

(a) B(1, Z), 圧力比2.0

(b) B(1, Z), 圧力比2.5

(c) B(2, Z), 圧力比2.0

(d) B(2, Z), 圧力比2.2

(e) B(2, Z), 圧力比3.0

図8 音響スペクトル

空げき率の大きい B 形多孔管には、低圧域で余剰騒音があり、圧力比を増加させると、ある点で音圧レベルが急激に減少する傾向があるが、これが急拡大管と類似であることから、この余剰騒音ははく離に伴う騒音であることが推察される。図 9 (a) のしま模様のしま間隔は、ピーク周波数約 16 kHz の波長と一致しており、はく離渦の流出によると推定される。B(2, Z) 多孔管で圧力比を増加させると、流れパターンははく離流れから衝撃波を伴う流れに変わって、そのとき、音圧レベルの急激な減少がある点は急拡大管と類似している。一方 A(1, L) 多孔管では前報で示したように、適正な圧力比範囲内ではほぼ等エントロピー膨張があり余剰騒音の発生もなかった。また圧力比 2.2 から 3.5 までの音圧レベルの変化はちょうどマッハ数の八乗則⁽⁷⁾に従っていることが確かめられた。適正な空げき率の多孔管は、設計マッハ数で稼動する先細末広ノズル(超音速ラバール管)に似た働きがあるといえる。空げき率はノズル断面積の軸方向増分に対応するものと考えられる。多孔管の孔からの流体の漏えいが不都合をもたらす場合がある。この点を改善するためシュラウドを取付けたところ、低圧域で騒音軽減がある、高圧域でも音圧レベル増加なしに推力の増加が得られる場合があることが確かめられた。シュラウドと多孔管壁のすきまで形成される気柱共鳴に関して異なるものの、一般的にシュラウドの取付けは、空げき率を小さくすると同等の効果がある。適正な空げき率の多孔管の場合、有孔シュラウドを取付けても、消音効果の改善はないが、空げき率が過大な場合、それにより騒音軽減効果を持つ場合がある。良好な組合せは A(1,

L)+PS15, B(1, Z)+PS15 および B(2, Z)+PS15 であった。有孔シュラウドは多孔管の空げき率の微調整に役立つものと考えられる。有孔シュラウドのみ、すなわちノズル径より大きな直径の多孔管は、ノズルと同径の多孔管より消音効果が悪い。これは、急拡大と空げき率が同じ効果を持つため、空げき率が適正値からいっそうずれたためだと考えられる。空力的には、適当な圧力比の範囲内で、多孔管の取付けにより推力も増加することは注目すべきである。この推力の増加は圧力比の増加につれて減少するが、この原因は高圧力比領域では、出口速度の増加を多孔壁からの漏えいによる運動量損失の増加が上回るためだと考えられる。今回の実験範囲内ではシュラウド取付けにより運動量(推力)の増加もしくは損失防止があった。高圧域になると推力は、基本ノズルのみのほうが多孔管などを取付けた場合より高くなったが、推力当たりの音圧レベルは適正な空げき率の多孔管取付けにより図 12 に示すとおり明らかに減少した。

図 9 シュリーレン写真

図 10 出口マッハ数 r は軸からの距離

図 11 圧力比と推力との関係

図 12 推力と音圧レベルとの関係

6. 結 論

(1) 多孔管の特性は、管長のほか、空げき率分布による。すなわち管軸上同位置の多孔壁面積要素の空げき率が等しい場合、特性はほぼ等しい。ただし孔径が小さいほど、圧力比に対する音圧レベルの変化は連続的である。

(2) 適正な空げき率を持つ多孔管は、超音速ラバ

ール管と類似の空力および音響特性があり、過大な空げき率を持つ場合は、急拡大管と類似の音響特性を持つ。

(3) シュラウドの取付けは、多孔管の空げき率を小さくするのと同じ働きがあり、その効果は径比が小さいほど大きい。やや過大な空げき率の多孔管とシュラウドを組合せて空力損失を防ぎ消音効果を高めるよう空げき率の効果を調節することができる。

(4) 適正な多孔管あるいはシュラウド付きの多孔管により推力当たりの騒音は、大幅に減少する。

本実験を行うにあたり、畠田 卓、竹下 知裕、および野田 亨 三君の協力があつたことを記し、感謝の意を表す。

文 献

- (1) 光安・瀬戸, 航空会誌, 19-209 (昭46), 227.
- (2) Powell, A., *Proc. Phys. Soc.*, B767 (1954), 313.
- (3) 瀬戸・ほか2名, 機論, 53-485, B (昭62), 268.
- (4) 杉山・ほか2名, 機論, 49-443, B (昭58), 1420.
- (5) 文献(4)の1427ページ.
- (6) Yamamoto, K., ほか, *NASA Contract. Rep.*, 3845 (1984).
- (7) Lighthill, M. J., *AIAA J.*, 1-7 (1963), 1507.