プラグノズルおよび多孔管を用いた消音器の開発*

瀬戸 邦 聡^{*1}, 松岡 宗 治^{*1}

Contoured Plug Nozzle and Perforated Tube as a Noise Suppressor

Kunisato SETO and Muneharu MATSUOKA

In order to increase the noise-reducing effect of a perforated tube, a plug is combined with a perforated tube. The plug is designed to change an underexpanded jet into a parallel flow. We derived the expression of a sonic line in an annular nozzle. The flow field downstream of the sonic line was, then, calculated straightforwardly by the method of characteristics. A couple of plugs were designed, manufactured and tested on convergent nozzles. Acoustical measurements and optical observation with a Toepler-Schlieren system were carried out. The plug was able to reduce shock strength but did not cancel it. The combination of a plug and a perforated tube considerably improved the noise-reducing effect of a plug nozzle.

Key Words: Noise Suppressor, Perforated Tube, Compressible Flow, Plug Nozzle, Sonic Line

1. 結 言

地球規模の経済活動の進展に歩調を合せて、超音速旅客機の再開発が進行中である。先発超音速旅客機コンコルドの市場参入を困難にした原因である燃料経済性と環境適合性(特に騒音)が次世代機の主要テーマであることは、周知のとおりである。すなわち、この問題を解決するエンジンの開発が待たれており、バイパスエンジン、バリエアブルサイクルエンジン等の開発が進められている。ジェットエンジンの静音化対策としては、バイパス化が主流であり、高バイパス比ターボファンエンジンを搭載した、現在のジャンボジェット機は初期の B 707 機に比べて 20 EPNLdB の低減化を実現した。今後、いっそうの静音化を計るためには、逆転速度分布をもつバイパスエンジン、ポーラスプラグノズルあるいはシュートタイプの消音器にバリエアブルサイクルを組合せたものが有望視される。ジェットエンジン騒音はファン騒音、タービン騒音、コア騒音、ジェット騒音に大別され、ファン騒音が在来エンジンの主要音源であるが、飛行速度の増大に伴う排気速度の増加につれジェット騒音の影響が増大する。ターボフ

ァンエンジンでは、タービン後部のベアリングカバーが容易にプラグ形状に整形できるため空力性能の向上と静音化に利用されてきた。特に、騒音軽減のためプラグを多孔表面にすることにより、さらに数 dB の静音化が達成できたが、プラグそのものは設計点以外ではその消音効果が弱い。本研究はジェット騒音の低減化のため、従来のプラグノズルに多孔管を組合せ、非設計点における消音効果を増すと同時に、適当なプラグ形状により多孔壁からの排気流の漏えいの軽減を計ったものである。なお、このプラグノズルでは表面を多孔壁にすることは、加工上たいへん困難な割には消音効果は期待できない。また、本研究の成果は、IC 製造ラインのエアダスタ等の消音器としても直接応用できる。不足膨張状態で気体を大気中に噴出すると、噴出後気流中にショックセルまたはマッハディスク構造が生じ、スクリーチ音が発生する⁽¹⁾。この種の騒音を除去する方法として、多孔管⁽²⁾⁽³⁾、急拡大管⁽⁴⁾⁽⁵⁾あるいはプラグを用いる方法がある。プラグや多孔プラグの特性は、Dosanjh⁽⁶⁾ その他らにより研究報告がなされている。特に Dosanjh の方法によるプラグは、比較的小形であり設計点では等エントロピーにより軸に平行な噴流境界をもたらすなど興味深い。しかし彼はプラグ形状の計算にやや冗長な、繰返し法を用いており、

* 原稿受付 平成 5 年 7 月 19 日。

*¹ 正員、佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町 1)。

ノズル形状の変化に対する系統的なプラグ形状特性を明らかにしていない。本研究では、簡便なプラグ形状の計算方法を示し系統的な計算を行った。また、プラグの短所である非設計点での消音効果の低下を補うための多孔管との有効な組合せ方についても報告する。

2. プラグ形状の計算

2.1 音速線の計算 図1に示すプラグ形状のパラメータであるプラグ半径 R_p および初期こう配 ϕ を決定するため図2のような軸対称プラグノズルのど部近傍の流れの環状要素を考える。いま、点2の半径を $r (=R_2)$ 、流れ角を $\theta (= \theta_2)$ 、点1の半径を $r + dr (=R_1)$ 、流れ角を $\theta + d\theta (= \theta_1)$ と置くと音速線を含む流管の断面積が極小値をとることから点2を通る流線の微小長さ dL に対して

$$\begin{aligned} 2\pi r dr / \cos \theta \\ = 2\pi(r - dL \sin \theta)\{r + dr - dL \sin(\theta + d\theta) \\ - (r - dL \sin \theta)\} / \cos \theta \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

あるいは

$$r \cos \theta d\theta + \sin \theta dr = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$r \neq 0$ として全体を $r \sin \theta$ で割って積分することにより

$$r |\sin \theta| = C_1 = \text{const.} \dots\dots\dots (3)$$

を得る。さらに音速面では流線と音速線とが直交する。音速線の形状を $y = y(x)$ とすれば

$$\frac{dy}{dx} = \cot \theta \dots\dots\dots (4)$$

式(3)、(4)から

$$\frac{dy}{\sqrt{y^2 - C_1^2}} = \frac{dx}{C_1} \dots\dots\dots (5)$$

ノズルのど部を $x=0$ に取り、そのときの音速線の高さがノズル半径 R_n に等しいとし、 $y=R_n$ の条件で式(5)を積分すると音速線

$$y = C_1 \cosh\left(\frac{x}{C_1} + C_2\right) \dots\dots\dots (6)$$

$$y = R_n \left\{ \cosh\left(\frac{x}{C_1}\right) + \cos \theta_e \sinh\left(\frac{x}{C_1}\right) \right\} \dots\dots (7)$$

を得る。またそのこう配は

$$\frac{dy}{dx} = \sinh\left(\frac{x}{C_1} + C_2\right) \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\left\{ \sinh\left(\frac{x}{C_1}\right) + \cos \theta_e \cosh\left(\frac{x}{C_1}\right) \right\}}{\sin \theta_e} \dots\dots\dots (9)$$

となる。ただし

$$C_2 = \cosh^{-1}\left(\frac{1}{\sin \theta_e}\right) \dots\dots\dots (10)$$

$$C_2 = \log_e (1 + \cos \theta_e) - \log_e (\sin \theta_e) \dots\dots\dots (11)$$

さて、設計マッハ数を与えれば断面積比とマッハ数との関係からノズルのど部の断面積 S_s が与えられる。一方音速線に沿って積分することにより S_s は以下のように表される。

$$S_s = \int_{x_1}^{x_2} 2\pi y dy = \int_{x_1}^{x_2} 2\pi y \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \dots\dots\dots (12)$$

任意の $x_1 (< 0)$ に対して、 $x_2 = 0$ として式(6)および式(8)を代入して積分を実行すると

$$\begin{aligned} S_s = \pi R_n^2 \left\{ \cos \theta_e - \frac{1}{2} (1 + \cos^2 \theta_e) \sinh\left(\frac{2x_1}{C_1}\right) \right. \\ \left. - \cos \theta_e \cosh\left(\frac{2x_1}{C_1}\right) \right\} - \pi R_n x_1 \sin \theta_e \dots\dots (13) \end{aligned}$$

最終的なノズル出口における流れが軸に平行な一様流である場合にはノズルのど部と出口での断面積比と出口マッハ数との関係から

$$\begin{aligned} \frac{S_s}{\pi R_n^2} = \left\{ \cos \theta_e - \frac{1}{2} (1 + \cos^2 \theta_e) \sinh\left(\frac{2x_1}{C_1}\right) \right. \\ \left. - \cos \theta_e \cosh\left(\frac{2x_1}{C_1}\right) \right\} - \left(\frac{x_1}{R_n}\right) \sin \theta_e \\ = M \left\{ \frac{2 + (x-1)M^2}{x+1} \right\}^{-(\kappa+1)/2(\kappa-1)} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

ただし M および x はそれぞれ一様流のマッハ数および比熱比である。

2.2 特性曲線法 プラグ半径 R_p 、こう配 ϕ および音速線を与え特性曲線法を使ってプラグ形状を求める。本計算では後述の多孔壁の効果は考慮していない。噴流境界は自由壁(圧力一定)とし、噴流境界が軸と平行となるようにプラグ形状を決定する。結果的にこれは多孔性の効果を見逃した設計圧力比における多孔管

図1 外部膨張プラグノズルと完全膨張流の概略図

図2 プラグノズルのど部の微小環状要素

内の流れに相当する。

流れは軸対称とし Prandtl-Meyer 角を ν , 流れ角を θ とすると図 3 に示す特性方向 ξ, η 軸に沿って

$$(\nu_3 + \theta_3) - (\nu_2 + \theta_2) = \int_2^3 \frac{\sin \mu \sin \theta}{r} d\xi \dots\dots (15)$$

$$(\nu_3 - \theta_3) - (\nu_1 - \theta_1) = \int_1^3 \frac{\sin \mu \sin \theta}{r} d\eta \dots\dots (16)$$

ここで点 1, 2 は既知であり点 3 は求める点である。また ξ 軸上では $\sin(\theta - \mu) d\xi = \Delta r$, η 軸上では $\sin(\theta + \mu) d\eta = \Delta r$ の関係があるので 2~3, 1~3 間を直線近似すると

$$(\nu_3 + \theta_3) - (\nu_2 + \theta_2) = \frac{\sin \mu \sin \theta}{\sin(\theta - \mu)} \log_e \frac{r_3}{r_2} \dots\dots (17)$$

$$(\nu_3 - \theta_3) - (\nu_1 - \theta_1) = \frac{\sin \mu \sin \theta}{\sin(\theta + \mu)} \log_e \frac{r_3}{r_1} \dots\dots (18)$$

を得る。なお、式(17)および式(18)で μ は Mach 角である。また、 θ, μ は平均値を採用しており、平均値の計算方法は文献(1)と同じである。

2.3 プラグ形状の計算 噴流境界が噴流軸と平行になるような形状の決定法を述べる。いま噴流境界上の値を添字 b プラグ上の値を添字 p で表すと、境界上の値は既知、プラグ上の値は未知であるから、式(15), (16)で点 3 をプラグ上、点 1 を噴流境界上に取ることにより

$$\nu_p = \frac{1}{2} \left\{ (\nu_2 + \theta_2) + (\nu_b - \theta_b) + \int_2^p \frac{\sin \mu \sin \theta}{r} d\xi + \int_b^p \frac{\sin \mu \sin \theta}{r} d\eta \right\} \dots\dots (19)$$

$$\theta_p = \frac{1}{2} \left\{ (\nu_2 - \theta_2) + (\nu_b - \theta_b) + \int_2^p \frac{\sin \mu \sin \theta}{r} d\xi - \int_b^p \frac{\sin \mu \sin \theta}{r} d\eta \right\} \dots\dots (20)$$

を得る。なお、 ν_b は圧力比から導かれる噴流境界上の Prandtl-Meyer 角、 θ_b は噴流境界上の流れ角でこの場合零である。 ν_b および θ_b は既知であるが、積分経路 $p-b$ は未知であるので、式(19), (20)右辺第 4 項を最初零と近似し、 ν_p および θ_p を求めて、経路 $p-b$ の近似値を計算する。その繰返し計算により ν_p および θ_p を決定する。

図 3 特性曲線 ξ, η 軸と計算点

3. 計算結果

音速線はこの場合ノズル出口半径と先細角により決まり、式(6)または式(7)により与えられる。図 4 は代表的な先細角に対する音速線形状を示す。パラメータはノズル先細角(°)である。各音速線とものど部上流の 1 点で極小値をもつ。プラグ形状の計算に必要な音速線の長さは式(14)により一様流のマッハ数を与えることにより求められ、マッハ数が低いほど対応する先細角は小さくなり音速線は下に伸びてくる。噴流境界が噴流軸と平行になるためには、プラグは固有の形状をもたねばならない。この形状は先細角 θ_e と、圧力

表 1 プラグ形状関数の各係数

θ_e	Eq.	A	B	C	D	E
5°	(22)	0.232	-0.345	0.138	-0.022	0.011
10°	(22)	0.483	-0.560	0.208	-0.033	0.002
15°	(22)	0.413	-0.497	0.125	0.072	-0.033
30°	(21)	-1.144	0.944	2.508	-0.117	-0.194
45°	(21)	-1.164	0.726	2.319	-0.076	-0.117
60°	(21)	-1.135	0.497	2.193	-0.034	-0.048
75°	(21)	-1.132	0.364	2.154	-0.032	-0.015
85°	(21)	-1.121	0.293	2.130	-0.063	-0.018

図 4 代表的な先細角に対する音速線形状

図 5 代表的な先細角に対するプラグ形状

図 6 非設計圧力比における噴流形状

比によって決まる噴流境界での Prandtl-Meyer 角 ν_b とを等しく置いて決定できる。種々の先細角に対して適正圧力比条件で軸と平行な噴流をもたらすプラグ形状を図5に示す。この形状は、座標系をノズル半径で無次元化することにより、だ円

$$y^2 = A + Bx + Cy + Dxy + Ex^2 \quad \cdots \cdots (21)$$

または四次曲線

$$y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 + Ex^4 \quad \cdots \cdots (22)$$

できわめてよく近似できる。特に先細角が大きな場合、前者でよく近似できる。すなわち、先細角が 30° 以上では式(21)、 15° 以下では式(22)が適している。先細角に対する各係数の値を表1に示す。図5は同時に、設計圧力比条件でプラグを過ぎる噴流形状を示す。この流れは軸に平行で衝撃波を含まない一様流である。一方、非設計圧力比での噴流形状は設計圧力比より低い場合、プラグ上に衝撃波が形成することが図6の計算例でも示される。この計算は、先細角 30° 、圧力比 $3.4(\nu_b=10^\circ)$ の条件で行ったものである。

4. 実験

先細角 15° 、および 30° に対して上記の方法で計算したプラグを製作し、各ノズルに取付けシュリーレン観測と音響測定を行った。基本ノズルのみの場合、一般に圧力比の増加につれ当然音圧レベルは増加するが、圧力比4近傍で強いスクリーチ音を発生することがある。この圧力比は膨張角(=Prandtl-Meyer 角) 15° に相当するものであり、前者はこのスクリーチを除去するために、また後者はより広い範囲での消音効果をねらって選んだ値である。プラグ取付けによる断面積の減少を式(14)で計算すると、減少率は前者で約22%、後者で約47%であることがわかる。また非設計点における消音対策のためプラグと多孔管を併用した実験を行った。これは、通常ノズルに対して広い圧力比範囲で効果が確認された多孔管の新たな応用を探るための実験でもある。さらに圧力比が高い場合多孔管からの流れの漏えいをプラグが抑える効果も期待できる。図7にプラグと多孔管の取付図を示す。図8に示

図7 プラグと多孔管の取付図

す $3.5 \times 3 \times 2$ m の半無響室でノズル出口直角方向 0.5 m に測定点を設けた。周波数範囲は $20 \sim 100$ kHz であり、リニア特性値で表示した。圧力比の範囲は $1.5 \sim 11.0$ であり、刻み幅を 0.5 とした。さらに FFT 解析装置により音響データを解析し、シュリーレン観測結果に基づく衝撃波構造や流動特性と比較検討した。

5. 実験結果および考察

5.1 プラグノズルの流動および音響特性 非設計圧力点での流れのシュリーレン写真および音響スペクトルの一例を図9に示す。先細角 30° 、圧力比 3.5 の場合であり、図6の計算値とだいたい同じ条件となっている。図9からわかるようにこの場合圧力比が設計圧力比より低い場合の計算で予想されたとおりプラグ上に衝撃波が発生し、音響スペクトルにも鋭いピークが観察され、スクリーチ音の発生を示す。この音が衝撃波に起因することはあきらかである。設計圧力点での流れのシュリーレン写真およびそのときの音響スペクトルを図10および図11に示す。噴流境界は軸と平行になることが確認できる。角度 15° 、 30° の場合のノズルおよびプラグノズルの音響特性を図12、13に示す。図12、13には理論音圧レベルを比較のために載せている。理論音圧レベルは

$$W_A = K \cdot \frac{\rho_1^2 V^8}{\rho_0 C_0^5} \cdot d^2 \quad \cdots \cdots (23)$$

で計算した。ここで、 ρ_0 、 ρ_1 はそれぞれ大気、噴流の密度、 c_0 は大気中の音速、 V は噴出速度、 d はノズル出口直径であり d^2 は面積に相当する。 K は音響パワー

図8 音響測定点

図9 30° プラグノズル非設計点でのシュリーレン写真と音響スペクトル

図 10 15°プラグノズル設計点でのシュリーレン写真と音響スペクトル

図 11 30°プラグノズル設計点でのシュリーレン写真と音響スペクトル

図 12 15°プラグノズルの音圧レベルと理論値の比較

図 13 30°プラグノズルの音圧レベルと理論値の比較

係数であり W_A の単位を W で表現した場合、 0.8×10^{-4} を用いた。表示された音圧レベルはリニア特性値である。プラグ挿入により出口面積減少を考慮していずれも有効直径が 10 mm に換算した値で表現している。なお、プラグノズルの設計圧力比は 15° の場合が 4.3、30° の場合が 9.6 である。一般的にノズル、プラグノズルとも理論音圧値をかなり上回っている。これは、衝撃波関連騒音の発生を示すものである。ノズルに対して図 12 から設計圧力比の近くでは 15° プラグで約 18 dB、図 13 から 30° プラグで約 1.5 dB の消音

図 14 15°プラグノズルと多孔管の併用による音圧レベル

図 15 30°プラグノズルと多孔管の併用による音圧レベル

効果があるが、他の圧力比では消音効果は小さくなり、逆に、騒音レベルが増大している。15° のプラグノズルの場合、圧力比 5 以下に限れば非設計点でもかなりの消音効果があるが、30° の場合、圧力比 5~8 で音圧レベルが増加しており設計点以外には適しないことがわかる。

5.2 多孔管による音響特性の改善 非設計点での逆効果を排除し、いっそうの音響特性改善を計るため、多孔管をプラグノズルに取付けた。多孔管は内径がノズル出口直径と同じ 10 mm、長さ 50 mm に統一した。空げき率(=全孔面積/表面積)を 0.22(A 形)と 0.44(B 形)の 2 種類、孔直径を 1 mm と 2 mm の 2 種類、孔配列を格子状(L 形)と千鳥状(Z 形)の 2 種類の計 5 種類を使用した。実験結果は、孔配置および孔直径によらずおおむね空げき率により支配されたので、代表的に孔直径 1 mm、空げき率 0.22 の千鳥状多孔管である A (1, Z) と、空げき率 0.44 の同形多孔管 B (1, Z) の結果のみを記載する。多孔管の併用により、15, 30° プラグノズルともに非設計点領域でも十分な消音効果が確認できた。図 14 は、15° プラグノズルと多孔管とを併用した場合の音圧レベルをノズルや多孔管だけのデータと比較している。A, B 形の 2 種類の多孔管の併用によって、圧力比 3 以上の領域で、急激な圧力変化の生じない緩やかな音圧レベルの上昇曲線を示す。ノズル、プラグノズルのみの音圧レベルの急激な変化が抑制されている。なお、設計圧力比の音圧

レベルも 2 dB ほど低下しており、非設計圧力比のプラグノズルの逆効果は、十分に解消されていることがわかる。同様に、図 15 は 30° プラグノズルについての図を示しており、この場合にも多孔管との併用により、圧力上昇に伴う音圧レベルの急激な変化が抑制されており、非設計圧力比での逆効果も解消されている。また、空げき率の違いによる効果として高圧力比においては、空げき率 0.44 の B 形が、低圧力比においては、空げき率 0.22 の A 形が、より大きな消音効果を示した。すでに報告にあるとおり⁽²⁾⁽³⁾、多孔管のみの使用により大きな騒音低減効果があるが、適当なプラグとの併用により流体の漏えいの軽減と設計点近傍での消音効果の改善がある。一方、非設計点ではプラグを取付けたほうが消音効果が悪化する場合もあることがわかる。

6. 結 言

(1) 与えられたノズル出口径とノズル先細角より、音速線およびプラグ形状を計算する方法を確立した。ノズル先細角を系統的に変化してプラグ形状の特徴をまとめた。その結果、プラグ形状はだ円あるいは、四次曲線で表現できることを示した。

(2) 15, 30° プラグノズルで、それぞれ設計圧力

比において、ノズルのみの場合より 18, 1.5 dB, の消音効果があった。特にプラグ 15° は低圧力比領域で消音器として有効であることが示された。しかし、非設計圧力比において逆に騒音が上昇する部分が生じるので、圧力比が変化する場合には、消音器としての使用が限定されることがわかった。

(3) 多孔管をプラグノズルと組合せて使用することにより、プラグノズルの非設計圧力比においても大きな消音効果があった。設計圧力点では、多孔管の管壁からの空気の流出がなく、消音効果も増大した。

(4) A, B 形多孔管により、空げき率の違いで消音効果に差があることがわかった。空げき率の影響は圧力比により異なり、A 形は低圧領域で、B 形は高圧領域で有効であることがわかった。

文 献

- (1) 瀬戸・ほか 1 名, 日本航空宇宙学会誌, 30-341(1982), 329.
- (2) 瀬戸・ほか 2 名, 機論, 53-485, B(1987), 268.
- (3) 瀬戸・ほか 1 名, 機論, 54-504, B(1988), 2061.
- (4) 児島・ほか 1 名, 機論, 52-477, B(1986), 2021.
- (5) 児島・ほか 1 名, 機論, 53-495, B(1987), 3146.
- (6) Dosanjh, D. S., ほか 1 名, AIAA J., 26-8(1988), 924.