E103

超音速ノズル内に生じる衝撃波の振動と騒音に関する研究

与那嶺 牧子[○] (九州大学), 川島 直晃 (九大院),

鄭 星在 (九州大学), 青木 俊之 (九州大学)

Research on Vibration of Shock Waves Caused in a Supersonic Nozzle and Generated Noise

Makiko YONAMINE, Naoaki KAWASHIMA, Sungjae JUNG and Toshiyuki AOKI

ABSTRACT

The present paper describes experimental works to investigate noise phenomenon in supersonic flow that is discharged from a convergent-divergent nozzle. The noise phenomenon of flow is generated by an emission of 'transonic tones' that can be occurred independently of the general noise components at low pressure ratios that a shock wave arise within the divergent section of the nozzle. The results of obtaining show that the value of predominant frequency of the wall static pressure fluctuation in the shock wave downstream is almost corresponding to the value of the frequency in which the transonic tone is shown.

Keywords : Compressible flow, Noise, Shock wave, Schlieren method, Transonic resonance

1. 緒 論

超音速噴流は、ジェット機の推力制御、ジェットエンジンの燃料混合、スートブロー、高速フレイム溶射など各種工業分野で幅広く利用されているが、近年の流体機械の高速化に伴い、簡単に対処できない流体騒音が問題となっている。衝撃波を伴う超音速噴流騒音については、噴流中に存在する衝撃波とノズルリップとの間に発生するフィードバック機構によって生じるスクリーチ騒音¹⁾の存在が確認されており、その特性や騒音低減法などに重点が置かれた研究が行われてきた。しかし近年、噴流装置の作動圧力比が比較的小さく、超音速ノズル内に衝撃波が存在する場合においても、スクリーチ騒音に似た離散的な周波数成分をもつ騒音が生じることがわかった。Zaman²⁾はこの騒音を'transonic tone'と呼び、衝撃波がノズル末広部に存在しない場合は発生せず、衝撃波に起因する騒音である事を明確に示した。また、彼らは transonic tone の周波数の値を予測する実験式を導出し、ノズルの長さや角度などの形状とノズルの作動圧力比に依存する事を明らかにした。さらに、ノズル壁面における感温塗料による温度計測および衝撃波下流領域の中心軸上におけるピトー圧力計測を行い、衝撃波とノズル出口間において管の気柱共鳴の腹と節にあたる位置が存在する事を示し、transonic tone の発生メカニズムを、衝撃波下流のノズル内部における定在波にあると推測し

ている。しかし一般に、超音速ノズル内に生じた衝撃波は境界層との干渉が強くなると擬似衝撃波となるため、ノズル内部は流れ方向に超音速領域と亜音速領域を伴う複雑な流れ場となる。よって定在波が生じるメカニズムについては不明な点が多く、transonic tone の発生メカニズムの解明には至っていない。

本研究では、ノズル内の流れ場の構造や振動と transonic tone の発生メカニズムの解明を目的とし、二次元ラバルノズルから発生する騒音とノズル内部の流れ場の振動の関係を調べたので、その一部を報告する。

2. 実験装置および方法

本研究で使用した実験装置の模式図を図1に示す。実験は、120Hz以上の周波数に対して自由音場を形成する無響室内で行った。図1の左端に示す高圧タンクと手動バルブを通った高圧乾燥空気は、よどみ室で一旦淀み状態となった後、ラバルノズルを通して大気に噴出される。本実験で使用した超音速ノズルの模式図を図2に示す。ノズルは二次元ラバルノズルで、スロート高さ 9.6mm, 出口高さ $D=16.2\text{mm}$, 末広部の長さ $L=46\text{mm}$, 幅 30mm, 設計マッハ数 2.0 である。ノズルの側壁には、シュリーレン法による流れの可視化を行うため光学ガラスを設置した。シュリーレン写真の撮像にはデジタルカメラを用いた。ノズル上流のよどみ圧力 p_0 と背圧の比をノズル作動圧力比 $\text{NPR}=p_0/p_b$ とすると、本研究では

Fig.1 Schematic of experimental apparatus.

Fig.2 Supersonic nozzle geometry.

Fig.3 Measurement points of sound pressure level.

NPR=1.2~2.8 の条件で実験を行った。図 2 に示すように、ノズル中心軸上におけるスロートの位置を原点として、流れ方向に x 軸、それに垂直に y 軸をとる。壁面圧力測定は、図中の○印に示すように、 $x/L=0.087, 0.22, 0.35, 0.48, 0.61, 0.74$ の位置に取り付けた半導体圧力センサ[TEAC(株)社製, XCS-190]により行った。圧力計の直径は 3.86mm、圧力孔は直径 0.5mm、深さ 1mm で、圧力計の受圧面と圧力孔でできる空間の固有振動数は約 10kHz である³⁾。圧力センサからの信号は、増幅器、オシロスコープを通った後、パーソナルコンピュー

タに入力される。データのサンプリング周波数は 20kHz、データ点数は 10000 点である。音圧測定は、図 3 に示すように、ノズル出口中心から 520mm、ノズルの中心軸に対して上流方向へ $\theta=60^\circ$ 、 72° 、 84° 、 96° の計 4 カ所で行い、直径 1/4 インチのマイクロホン〔(株)小野測器社製、MI-6420、20~20kHz〕を用いた。マイクロホンで得られた音圧信号は音圧スペクトルを得るため FFT アナライザ〔(株)小野測器社製、DS0221〕へ入力され、0~40kHz までバンド幅 25Hz で周波数解析された後パーソナルコンピュータに入力される。データ点数は 4096 点で、本研究ではそれぞれの条件において 20 回平均を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 音圧スペクトル分布と流れ場のシュリーレン写真

ノズル作動圧力比 $NPR=1.4$ の一定とし、測定位置がそれぞれ $\theta=96^\circ \sim 60^\circ$ における音圧スペクトル分布を図 4(a)~(d)に示す。どのスペクトル分布においても 800Hz 付近と 2.5kHz 付近においてピーク値を得ているが、これが transonic tone を示すスペクトルである。図 4(d)に示すように、測定位置がノズルの中心軸に近づくとき、噴流に近づくためスペクトル分布は全体的に大きな値となりピーク値も図 4(a)で示す値よりも大きくなるが、特に 2.5kHz 付近の transonic tone の値の増加は顕著である。このことから、高次の transonic tone は流れ方向に指向性を持つことが考えられ、この特性は上流方向に指向性を持つスクリーチトーンとは異なる特性である。指向性を考慮し、本論文ではこれ以降、 $\theta=72^\circ$ における音圧測定結果を用いて考察する。

次に圧力比を $\text{NPR}=1.4, 2.0, 2.6$ と変化させた場合の音圧スペクトル分布を図 5 (a)~(c)に、シュリーレン写真を図 6 (a)~(c)にそれぞれ示す。Zaman ら²⁾によると、スペクトル分布中に現れるピークの数 は開管における気柱共鳴音のモード数に対応しており、衝撃波とノズル出口間の空間には、周波数が低い順に $1/4$ 波長管、 $3/4$ 波長管と同様な定在波が存在する。本研究ではこれらの tone をそれぞれ modeA, mode B と呼ぶ事にする。図 5 (b)示す $\text{NPR}=2.0$ の場合、図 5 (a)において 2.5kHz 付近に発生していた modeB の transonic tone は $2.8\sim 3\text{kHz}$ 付近でブロードなスペクトル分布となって確認しづらくなり、modeA の周波数は 1.2kHz と $\text{NPR}=1.4$ の場合に比べると高い値を示す。これは図 6 に示すように、ノズル圧力比が高くなることによりノズル内に発生する衝撃波の位置が下流へと移動し、衝撃波とノズル出口間の距離が短くなることによる。その後、図 5 (c)に示す $\text{NPR}=2.6$ になるとピーク値は確認できなくなる。以上のことから、transonic tone の周波数はノズル圧力比

NPR に比例して高くなる特性を持ち、この点もスクリーチトーンとは異なる特性である。

Fig.4 Sound pressure spectra from experiment (NPR=1.4).

Fig.5 Sound pressure spectra at $\theta=72\text{deg}$.

Fig.6 Typical schlieren photographs.

3.2 壁面圧力測定

図6で示したように、本研究に用いた超音速ノズル内部の流れ場は、上下壁面にはく離領域が存在し、衝撃波は擬似衝撃波となつてため、ノズルの中心軸付近では、流れ方向にそつて超音速と亜音速領域が混在する複雑な流れ場となっている。よつて、本研究では transonic tone の周波数を決定する気柱共鳴がはく離領域付近で生じていると推察し、上壁面静圧変動の周波数解析を行った。その結果を図7(a)~(f)に示す。図7(a)に示す $x/L=0.087$ における壁面圧力変動は、パワースペクトル密度が0Hz付近に集中しており、圧力変動が小さい。図7(b)に示す $x/L=0.22$ は、図6(b)に示すように先頭衝撃波の上流であり、測定位置が衝撃波に近づくため圧力変動が生じるが、特に卓越する周波数は存在しない。図7(c)の $x/L=0.35$ の場合、ちょうど先頭衝撃波が振動している場所で圧力測定を行うため、約1kHz以下のブロードなスペクトル密度と、1kHz付近のピーク周波数が存在する。この周波数は先頭衝撃波の振動とその下流の圧力変動を表しているものと考えられる。また、1kHz付近のピークの値は図5(b)に示す音圧測定結果で得られた transonic tone の周波数 modeA とほぼ一致す

Fig.7 Power spectral density of wall static pressure fluctuation (NPR=2.0).

る。図 7 (d)~(f)の場合、測定位置が先頭衝撃波の下流ではなく離領域にあり、この場合は modeA に対応する周波数のピーク値が現れるが、図 7 (f)に示す $x/L=0.74$ ではパワースペクトル密度のレベルが小さくなる。この特徴は閉管の共鳴における開端付近の音圧分布の特徴と一致している。

4. 結論

超音速ノズルに発生する衝撃波に起因する騒音

‘transonic tone’ の発生メカニズムの解明を目的とし、二次元ラバルノズルを用いてシュリーレン法による流れ場の可視化、音圧測定、壁面圧力計測を行った。その結果、本研究で用いたノズル内部には擬似衝撃波が発生し、先頭衝撃波の上流ではブロードな周波数特性をもつ圧力変動が存在し、下流では transonic tone の周波数に対応する壁面圧力変動が存在する事がわかった。また、ノズル出口付近の壁面静圧のパワースペクトル密度は小さくなり、閉管の共鳴における音圧分布の特徴と一致した。以上のことから、先頭衝撃波下流のはく離領域付近で共鳴が生じることにより transonic tone 発生していると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Tam, C. K. W.: Supersonic Jet Noise, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.27, (1995) pp.17-43.
- 2) Zaman, K. B. M. Q. et al.: Investigation of ‘transonic resonance’ with convergent-divergent nozzles, J. Fluid Mechanics, Vol.463, (2002) pp.313-343.
- 3) 宮里義昭, ほか 4 名: 圧力センサの取付方と壁面変動圧力の測定値との関係, 九州大学総合理工学研究科報告, Vol.17, No.2 (1995) pp.253-260.