

# ジェット騒音に及ぼす擬似衝撃波の自励振動の影響について

児島 忠倫\*、馬 紅兵\*\*

## The Effect of Self-Excited Oscillation of Pseudo-Shock Waves on Jet Noise

Tadatomo KOJIMA, Hongbing MA

### ABSTRACT

In this report, the supersonic jet from a nozzle with different outlet divergent angles was studied, and the unsteady pressure and noise were measured. The temporal averages and instantaneous flow visualization were taken by shadowgraph method. In addition, the pressure fluctuation and also occurrence of noise were examined by the change of the nozzle exit divergent angle and difference of the pressure ratio. As a result, the jet structure and also the relevancy between the self-excited vibration and jet noise were clarified.

**Keywords:** Supersonic Flow, Flow Visualization, Self-Excited Vibration, Discrete Frequency Noise

### 1. 緒言

超音速噴流の工業的応用に伴い、超音速噴流中の衝撃波の発生、噴流の自励振動や騒音問題は、設計および作業環境上大きな課題となる。ノズルから噴出される超音速噴流は、周囲物へ及ぼす影響などが考えられ、空力音としてその発生音圧レベルが極めて高いスクリーチ音が発生し、ノズルや周囲物などの音響疲労破壊を招きうる<sup>(1)(2)</sup>。そのため、ノズル出口形状の違いにより噴流特性に及ぼす影響を明確にする必要がある。スクリーチ音の発生機構については、フィードバック機構<sup>(3)</sup>、マッハウエーブモデル<sup>(4)</sup>および離散周波数騒音の特性と衝撃波の挙動が相互に及ぼす影響<sup>(5)</sup>~<sup>(7)</sup>が報告されている。また、広がりノズルにより衝撃波の挙動および噴流の自励振動と離散周波数騒音の関連性<sup>(8)</sup>

についても明確にしているが、同じ広がり角度、広がり開始点が違うノズルからの噴流構造、自励振動および騒音の発生に及ぼす影響を調べ、ノズル出口形状の変化と圧力比の違いの研究も重要になる。

本研究では、広がりノズルから静止大気中に噴出される噴流について、ノズル形状と圧力比が噴流構造へ及ぼす影響を調べ、圧力変動と騒音を測定し、周波数分析を行っている。これにより噴流は、圧力比および出口広がり角度の違いによって全圧変動や騒音の発生源が異なり、噴流の構造も変化し、またノズル広がり開始点から出口までが 5m の TP9S-A10, A20, A45 のノズルとの噴流の挙動、振動を比較している。

### 2. 実験装置および方法

\*近畿大学工学部システムデザイン工学科 Department of System Design Engineering, School of Engineering, Kinki University

\*\*近畿大学工学部大学院工業技術研究科 Graduate School of Industrial Technology, Kinki University

Table 1 Shape of nozzles

symbol	$l$ $d$ $t$	$\theta^\circ$	shape
TP9S-A10L		10	
TP9S-A20L	46 9.2 10	20	
TP9S-A45L		45	

表1にノズルの諸寸法を示す。ノズル内径  $d$  を9.2mm、ノズル出口広がり開始点から出口までの距離  $t$  を10mmとし、出口広がり角度  $\theta$  が  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $45^\circ$  の3種類のノズルに対して、それぞれTP9S-A10L、A20L、A45Lと定義している。実験は、よどみゲージ圧  $P_0$  を大気圧  $P_a$  で除した圧力比  $P_0/P_a=1.006\sim 6.5$  の超音速域で、ノズルから静止大気中に連続的に噴出させ、流れの可視化、圧力測定および騒音測定を行った。流れの可視化はシャドウグラフ法により瞬間的に行った。また、圧力測定は噴流中心軸上とその垂直方向での噴流局所における非定常的な全圧変動を測定し、FFTアナライザでその周波数分析を行った。騒音の測定にはコンデンサマイクロホンを噴流中心軸に対して  $45^\circ$ 、噴出口から765mmの位置に取付け、計測用増幅器を用いてリニアスケール特性の音圧レベル SPL を測定し、FFTアナライザで周波数分析を行った。なお、噴流中心軸上を X 軸、噴流中心軸に対して垂直な方向を Z 軸と定義している。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 可視化による自励振動と騒音との関連性

##### 3.1.1. TP9S-A10L ノズルの噴流特性

図1に圧力比  $P_0/P_a=4.93$  における TP9S-A10L の瞬間的なシャドウグラフ写真と擬似衝撃波構造のスケッチを示す。数個のダイヤモンドセル形状の衝撃波群から構成される擬似衝撃波が見られ、第1セル後方の過圧縮域と第2セル前方の過膨張域から形成されている。 $X/d=4.5$  付近から噴流の自励振動によって流れは拡散し、第3セルからのセル構造は不明りょうとなる。また、出口部に生じる遮断衝撃波と反射衝撃波との接触面より細いスリップ面が生じている。また、流れのはく離点は、ほぼノズル出口端となっている。TP9S-A10の場合には、TP9S-A10Lより広がり部分が短く、出口直径も小さいため、噴流境界層の膨らみも小さくなる。また、スリップ面は圧力比4.0付近から消滅する傾向にある。

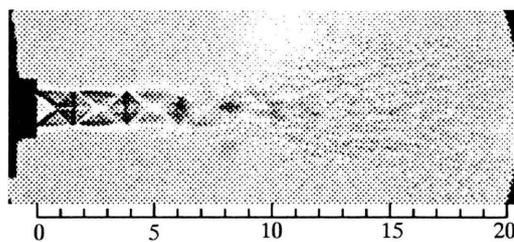


Fig.1 shadowgraph photograph and structure of jet flow on TP9S-A10L,  $P_0/P_a=4.93$

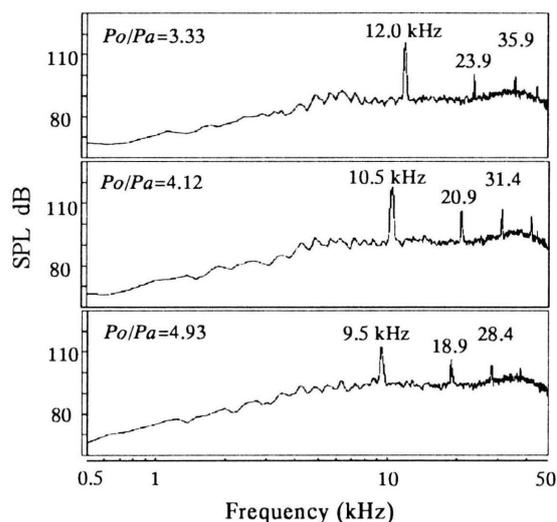


Fig.2 Frequency spectrums of jet noise on TP9S-A10L

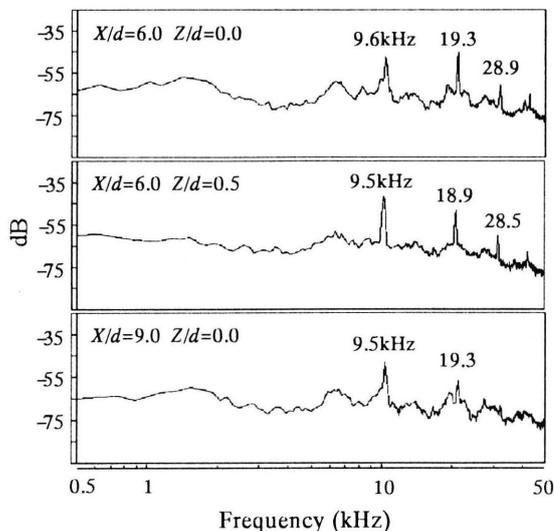


Fig.3 Frequency spectrums of pressure on TP9S-A10L,  $P_0/P_a=4.93$

図2にTP9S-A10Lの音圧レベルSPLと周波数の関係を示す。 $Po/Pa=3.0$ 以下の領域では、周波数ピークが現れない。 $Po/Pa=3.33\sim 4.93$ の領域では、多数のピークを有する離散周波数分布が見られ、ピークは基本周波数の整数倍の位置で発生し、圧力比の増加に伴い基本周波数は低周波数側へと移動する傾向にある。この後の高圧力比の領域ではピーク数は少なくなる。TP9S-A10の場合には、 $Po/Pa=2.14$ 付近からピークが発生し、この後全領域で多数のピークを有する離散周波数分布が見られた。

図3にTP9S-A10Lの $Po/Pa=4.93$ における圧力変動の周波数分析を示す。噴流中心軸上では、 $X/d=3.5$ 付近から周波数ピークが現れ始め、 $X/d=5.5\sim 9.0$ の領域で多数のピークが現れ、また $X/d=10.0$ 以降流れが拡散するため、ピークがなくなる。さらに、周波数ピークも基本周波数の整数倍の位置で発生している。鉛直方向では、 $X/d=2.5\sim 10.0$ で $Z/d=0.2\sim 1.5$ の広い範囲でピークが発生しているが、 $X/d=6.0$ で多数のピークが存在する以外、ほとんどの領域で単一ピークが現れている。

以上より騒音と圧力変動の周波数分析を比較すると、 $X/d=5.5\sim 9.0$ 付近までの領域でそれぞれの基本周波数、その他のピーク値の発生位置が一致する。可視化写真を見ると、この領域で流れの自励振動が大きくなる。これにより、噴流の自励振動が騒音に強く影響していると考えられる。

### 3.1.2. TP9S-A20ノズルの噴流特性

図4に圧力比 $Po/Pa=2.14$ におけるTP9S-A20Lの瞬間的なシャドウグラフ写真と擬似衝撃波構造のスケッチを示す。過膨張域と過圧縮域が形成され、数個のダイヤモンドセルが見られるが、隣り合うセル間の距離は短い。また、噴流の出口部分に小さなスリップ面が見られるが、第3セル以降では不明りょうとなっている。また、流れのはく離点は、ノズル広がり開始点の少し後方となっているものと推測される。TP9S-A20の場合には、噴流は早く拡散するため、形成する擬似衝撃波が短い。また、スリップ面はTP9S-A20Lと同様に、圧力の増加に伴い大きくなるが、短い。

図5にTP9S-A20Lの音圧レベルSPLと周波数の関係を示す。 $Po/Pa=1.50$ 付近までの領域では、多数のピークを有する離散周波数分布が見られ、ピークも基本周波数の整数倍の位置で発生し、これから $Po/Pa=2.52$ 付近まで単一のピークが現れ、その後 $Po/Pa=2.94$ 以降ピークがなくなる。一方、TP9S-A20では、 $Po/Pa=1.76\sim 2.94$ の領域でピークが見られる以外、他の全部で単一ピークが現れた。また、TP9S-A20では、圧力比の増加に伴い基本周波数は低周波数側へと移動するが、TP9S-A20Lでは高周波数側へと移動する傾向にある。

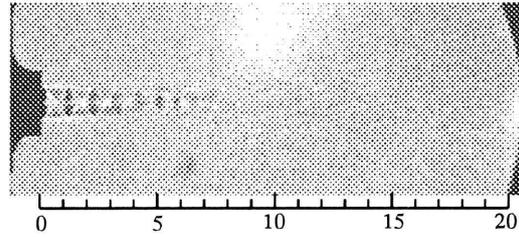


Fig.4 shadowgraph photograph and structure of jet flow on TP9S-A20L,  $Po/Pa=2.14$

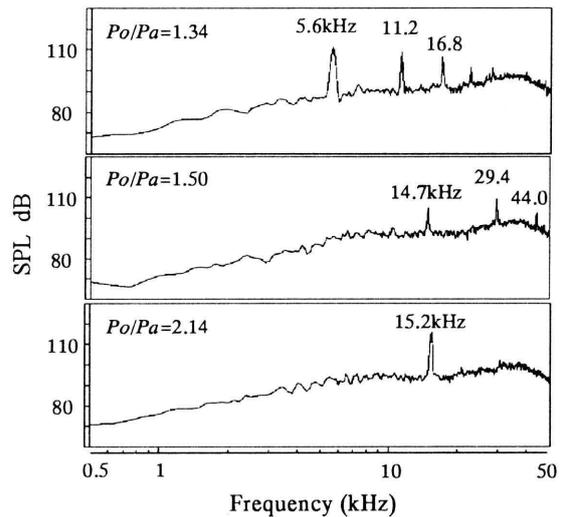


Fig.5 Frequency spectrums of jet noise on TP9S-A20L

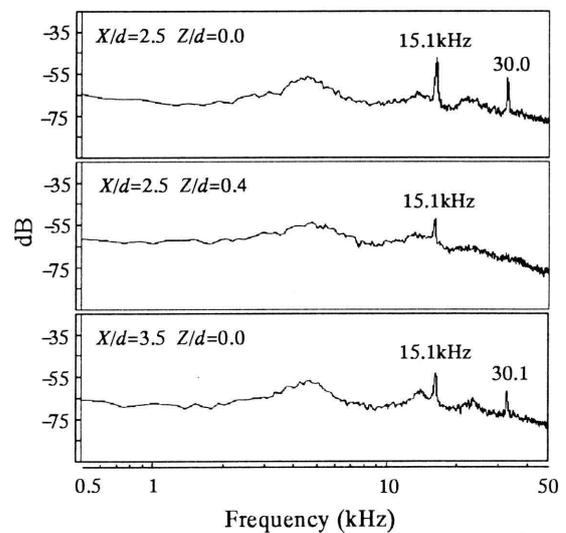


Fig.6 Frequency spectrums of pressure on TP9S-A20L,  $Po/Pa=2.14$

図6にTP9S-A20Lの $Po/Pa=2.14$ における圧力変動の周波数分析を示す。噴流中心軸上では、 $X/d=1.5$ 付近から周波数ピークが現れ、 $X/d=3.5$ 付近まで2個のピークが見られ、ピークも基本周波数の整数倍の位置で発生している。これ以降ピークは消滅している。また、鉛直方向では $X/d=2.5\sim 4.0$ 、 $Z/d=0.2$ からの領域のみピークが現れるが、単一ピークが見られる。

以上より騒音と圧力変動の周波数分析を比較すると、 $X/d=2.5\sim 4.0$ 付近までの領域でそれぞれの基本周波数、その他のピーク値の発生位置が一致する。可視化写真を見ると、この領域で噴流境界層に巻き込みがあり、流れも振動していることが確認できる。

### 3.1.3. TP9S-A45 ノズルの噴流特性

図7に圧力比 $Po/Pa=4.48$ におけるTP9S-A45Lの瞬間的なシャドウグラフ写真を示す。噴流境界が $X/d=5.0$ 付近までに見られ、ダイヤモンドセルが形成する。第1、第2セルが見られるが、 $X/d=3.0$ 付近から拡散が大きくなるため、第3セルは崩れかけている。また、第3セル付近までスリップ面が形成する。また、流れのはく離点はノズル広がり開始点付近となっているものと推測される。TP9S-A45 ノズルでは、TP9S-A45Lと比較すると、噴流は明けらかに短くなっているが、はく離開始点同じであるから、衝撃波の構造やスリップ面の大きさや形状には違いが見られない。

図8にTP9S-A45Lの音圧レベルSPLと周波数の関係を示す。噴流は全域で周波数ピークが現れる。 $Po/Pa=1.33\sim 4.48$ の領域で多数のピークを有する離散周波数分布が見られ、ピークも基本周波数の整数倍の位置で発生している。これ以外は単一ピークとなっている。また、圧力比の増加に伴い基本周波数は低周波数側へと移動する傾向にある。TP9S-A45の場合には、騒音の周波数分布はTP9S-A45Lとの分布が同じであるが、 $Po/Pa=5.5$ 以後の高圧力比の範囲でピークが消滅する傾向が見られた。

図9にTP9S-A45Lの $Po/Pa=4.48$ における圧力変動の周波数分析を示す。噴流中心軸上では、 $X/d=2.5$ 付近と $X/d=6.0\sim 8.0$ までの領域で2個のピークが現れる。また、鉛直方向では $X/d=6.0\sim 8.0$ 、 $Z/d=0.2\sim 1.0$ で2個のピークを有する離散周波数分布が見られ、他の領域で単一のピークが存在する。周波数ピークが基本周波数の整数倍の位置で発生している。

以上より騒音と圧力変動の周波数分析を比較すると、それぞれの基本周波数、その他のピーク値の発生位置が一致する。可視化写真を見ると、 $X/d=6.0\sim 8.0$ の領域で流れの拡散が激しく、また噴流境界層付近で流れの巻き込みのために振動する。したがって、自励振動がスクリーチ音の発

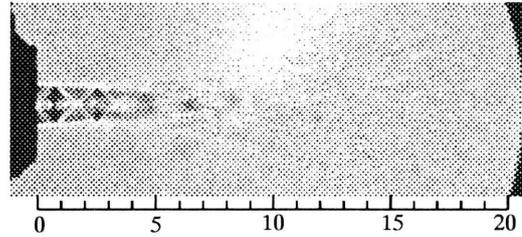


Fig.7 shadowgraph photograph and structure of jet flow on TP9S-A45L,  $Po/Pa=4.48$

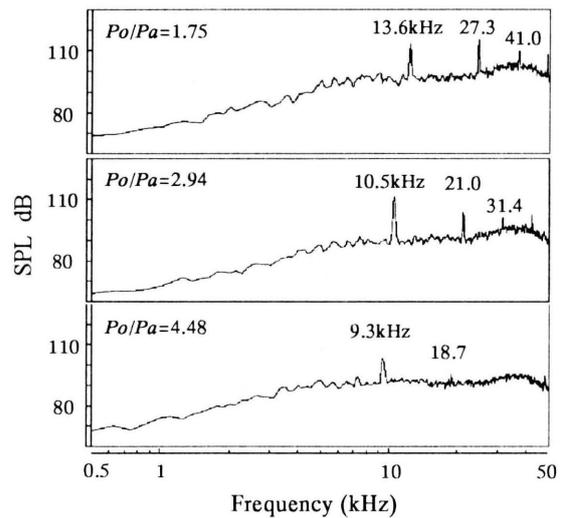


Fig.8 Frequency spectra of jet noise on TP9S-A45L

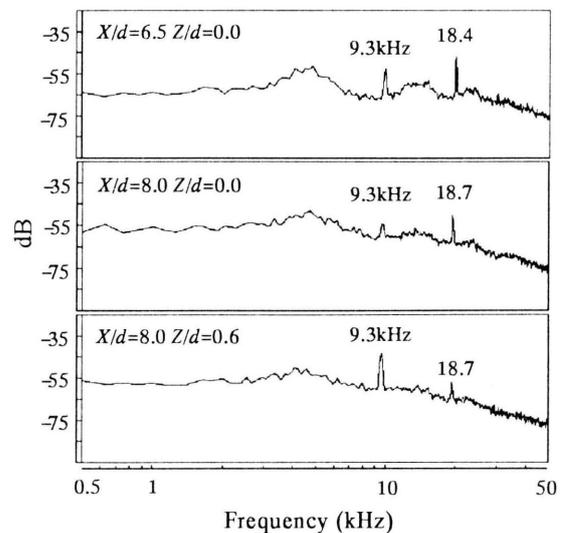


Fig.9 Frequency spectra of pressure on TP9S-A45L,  $Po/Pa=4.48$

生に影響を及ぼしていると考えられる。

#### 4. 結 言

(1) 騒音と圧力変動の周波数分析では、周波数ピークは基本周波数の整数倍の位置で発生し、基本周波数は一致する。

(2) TP9S-A10, TP9S-A20 では、圧力比 1 以下の亜音速域で渦輪が可視化されているが、TP9S-A45 では、渦構造は見られない。

(3) 基本周波数は、圧力比 1 以下では圧力比の増加に伴い高周波数側へ移動するが、圧力比 1 以上では低周波数側へと移動する傾向にある。

(4) 離散周波数騒音の発生には、低圧力比の亜音速噴流では渦輪の影響が大きく、高圧力比の超音速噴流では自励振動の影響が大きいと考えられる。

#### 参 考 文 献

- (1) 梶昭次郎:超音速ジェットスクリーチについて、日本流体力学会誌、ながれ 20 (2001) ,174-186.
- (2) 中野政身,田島清,熊井戸剣治:機論,55-520,B(1989),3716-3723.
- (3) Powell, A., *Proc. Phys. Soc.*, 66B(1953), 1039-1056.
- (4) Bishop, K.A., ほか 2 名, *J.Fluid Mech.*, 50-1(1971), 21-32.
- (5) 児島忠倫, 楊京龍,島津江麻里,松岡祥浩:離散周波数をもつジェット騒音の研究(第 1 報,騒音特性と発生機構),日本機械学会論文集(B) 61-585, C(1995), 1804-1809.
- (6) 児島忠倫,島津江麻里,松岡祥浩,楠井潤:離散周波数をもつジェット騒音の研究(第 2 報,渦輪の構造とその挙動の影響),日本機械学会論文集(B),62-594, B(1996), b637-644.
- (7) 児島忠倫, 嶽間沢秀孝,高田益臣,松岡祥浩:擬似衝撃波構造と離散周波数騒音の関連性(二値化画像法による解明),日本機械学会論文集(B), 65-629, B (1999), 78-85,
- (8) 児島忠倫, 劉渝, 塚本剛也:広がりのずるからの自励振動とジェット騒音との関連性、可視化情報, Vol.22, suppl.No.1(2002.7), 475-478