B107 画像処理による衝撃波構造とジェット騒音との関連性

近畿大工 児島忠倫, 近畿大工 獄間沢秀孝[○]
近畿大院 渡邊圭一, 近畿大理工 松岡祥浩

Relation between Structure of Shock Wave and Jet Noise by Digital Image Processing

Tadatomo KOJIMA *, Hidetaka GAKUMASAWA *,
Keiichi WATANABE ** and Yoshihiro MATSUOKA ***

In this report, it was described that the experimental results on the noise characteristics and discrete sound generation in a supersonic jet issuing from a nozzle with a divergent exit. The shock waves were visualized by Schlieren method or a high-speed video camera included its system, and the motion of the over compression regions were studied by the digital image processing. It was clarified that the behavior of over compression regions were periodical, and these periods related to the cause of frequency distribution noise.

1. 緒言

離散周波数分布をもつジェット騒音の発生機構の解明は、空力的な音響問題、騒音の低減化など、工学的に重要である。これまで、超音速噴流のスクリーチ音の発生機構については、噴流境界層内での流れの乱れと衝撃波の干渉に基づくフィードバック機構⁽¹⁾や、噴流のせん断層の幅よりかなり大きな渦構造によるマッハウエーブモデル⁽²⁾が報告されている。しかし、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について明確にした研究例はほとんど見られない。本研究は、出口広がり角をもつノズル⁽³⁾⁽⁴⁾から噴出される超音速ジェットについて、可視化および画像処理により、衝撃波セル内の過圧縮域の挙動を分析し、過圧縮域の周期運動が離散周波数騒音の周波数分布に及ぼす影響を明らかにしたものである。

2. 実験装置および方法

ノズルは、全長46mm、内径9.2mmのストレート管に45°の出口広がり角度を設けたものを使用した。ジェットは、ノズルから吸音室内の静止大気中に連続噴射され、よどみ圧力 P_0 と大気圧 P_a との比は1.74~2.91の範囲である。シュリーレンシステムによる瞬間的な流れの連続撮影には、高輝度Xeフラッシュ(せん光時間:200ns)を光源とするハイスピードカメラ(記録速度:100000コマ/s)を用いた。さらに、撮影された連続画像をCCDカラーカメラ(有効解像度:約380000pixel)を介して画像処理し、2値化画像法によって超音速噴流中に発生する衝撃波の挙動を調べた。過圧縮域のサイクル振動数や移動速度の算出は、過圧縮域の重心位置の移動より検討した。

*Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Kinki University, Umenobe, Takaya, Higashiroshima, 739-21, Japan

**Kinki University, Graduate Student

***Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Technology, Kinki University, Kowakae 3-4-1, Higashiosaka, 577, Japan

3. 実験結果および考察

3・1 可視化による擬似衝撃波の挙動 Fig. 1に、 $Po/Pa = 1.80$ の場合の噴流のシュリーレン写真（露光時間 $1/60$ s）を示す。これは、時間平均的な流れの特性を表しており、噴流中心を軸とする円錐形状の領域に軸対称の擬似衝撃波が存在する。図では、噴流のはく離がノズルの広がり開始点付近で生じ、ノズル内ですでに膨張域が存在するため、噴出直後に過圧縮域が現れ、噴流境界は第1セル下流からばう錐形状に可視化されている。これは自励振動と周囲流の巻き込みの影響により、噴流の拡散が激しくなるためである。

Fig. 2の(a)～(c)に、 $Po/Pa = 1.80$ における擬似衝撃波の挙動を示す。これらはハイスピードカメラを用いて撮影したあるシーケンスにおける瞬間写真であり、画像のフレームインターバルは $10\mu\text{s}$ で12コマ撮影したものを2コマおきに3コマ示した。各写真において、白色領域が過圧縮域を表している。Fig. 1に示した時間平均的な流れと異なり、各セルは瞬間的に噴流軸方向あるいは鉛直方向に移動し、衝撃波の変形を伴いながら周期的に振動するようすが観察された。Fig. 2(a)に示すように、ある時刻における6～7個の圧縮域について、奇数番目のものはその中心が噴流中心のX軸に対して鉛直Z軸の正領域（図の上方）に、偶数番目のものは負領域（図の下方）にそれぞれ存在している。また、ノズル出口に近い過圧縮域ほど円錐形であるが、下流になるにつれて噴流の拡散などにより崩壊する傾向があり、過圧縮域はやや棒状に変形している。 $20\mu\text{s}$ 後の(b)では、形状の変化は伴うものの(a)と同じそれぞれの領域内で変動している。しかし、さらに $20\mu\text{s}$ 後の(c)では、各セルの過圧縮域の中心は、(a),(b)とは逆の領域に移動して、奇数番目のものは負領域に、偶数番目のものは正領域に移動している。さらに、数フレーム後には、各セルの過圧縮域は(a)のような状態で存在し、過圧縮域の変動は周期性をもった振動パターンを示す。

3・2 2値化画像法による擬似衝撃波の振動パターン Fig. 3は、Fig. 2(a)の原画像を画像処理によって2値化したものである。Fig. 3では、白色の過圧縮域が6個抽出されて

Fig.1 Schlieren photograph, $Po/Pa = 1.80$

(a)1/12 (b)3/12 (c)5/12
Fig.2 Schlieren photograph by high-speed camera,
 $Po/Pa = 1.80$

Fig.3 Binary image of flow
visualization by digital
image processing

いるが、他のフレームにおいてもその数はほぼ同じであった。よって、本研究では、ノズル出口から5～6個までの過圧縮域について擬似衝撃波の振動パターンを検討することとし、それらの重心位置の算定を行った。

Fig. 4(a)～(c)に $P_0/P_a = 1.80$ における過圧縮域の重心移動を示す。図中の $\omega_1 \sim \omega_6$ は、それぞれ第1～第6セルの過圧縮域を表しており、時間の経過に伴って①～⑫の番号を付している。Fig. 4(a)に示すように、過圧縮域の重心は、X軸よりZ軸方向に大きな幅で振動している。これは噴流の自励振動によって鉛直方向の振動が大きくなるためである。また、同じセルにおける重心の変動幅は下流ほど大きくなり拡散する傾向にあるが、特に第4セルのZ方向の変動幅が大きい。この重心位置は $X/d = 3.30$ で、Fig. 1(a)に示した紡錘形の噴流境界幅が最大になる位置とほぼ一致している。Fig. 4(a)に示すように、第1セルの過圧縮域 ω_1 の重心位置は、他のセルに比較して変動が小さい。また、各セル間の無次元の重心間距離はほぼ同じで $\lambda_{\omega}/d \approx 1.0$ となる。

Fig. 4(b)に示すように、第2セルの過圧縮域の移動には、重心位置が①から②、③、…と移動して8の字を描きながら再び①付近（ここでは⑧）に戻るサイクルが発生している。Fig. 4(c)に示す第3セルの過圧縮域は、第2セルと半周期の位相差で同じサイクルで移動している。このような重心移動のサイクルは第4セルまで見られ、第5セル以降は周期性のない挙動を示した。1サイクルを構成するフレーム時間を求め、その逆数をサイクル振動数と定義すると、 $P_0/P_a = 1.80$ におけるサイクル振動数は、14.3kHzとなった。

(a) 1st - cell ~ 6th - cell

(b) 2nd - cell

(c) 3rd - cell

Fig.4 Mass center moving of over compression region, $P_0/P_a = 1.80$

3. 3 騒音の離散周波数分布特性と卓越周波数の発生機構

Fig. 5に、 $Po/Pa = 1.74$, 2.91 におけるパワースペクトルを示す。いずれも超音速噴流に特有のスクリーチ音の発生しているものを示している。顕著なピークを有する離散周波数は、最初に現れる第1ピークの周波数 f_0 (以下、基本周波数と呼ぶ) の整数倍の位置で発生している。この高周波数側のピーク群は、圧力比の増大に伴って消滅する傾向にある。なお、ここには示していないが、卓越周波数のほとんど現れない場

合には、Fig. 2のような衝撃波の挙動は可視化されず、鉛直方向の振動は小さくなる場合が多かった。 $Po/Pa = 1.74$ における基本周波数は $f_0 = 13.8\text{kHz}$ となり、これは前述の $Po/Pa = 1.80$ における画像処理から算出した過圧縮域のサイクル振動数とほぼ一致している。スクリーチ音の発生する他の圧力比の場合にも、 f_0 はサイクル振動数と良い一致を示した。したがって、超音速域における基本周波数のピークの発生は、ある一定の周期をもって振動する過圧縮域の挙動に起因すると考えられる。

4. 結言

出口広がり角度 45° をもつノズルにおいて、超音速で連続的に噴射される噴流について、衝撃波の挙動を可視化し、離散周波数騒音の発生機構との関係を調べ、以下の知見を得た。

(1) 第1セルの過圧縮域はほとんど変動しない。

(2) 過圧縮域の重心位置は、8の字を描くようにサイクル変動する。また、隣り合う過圧縮域は、半周期の位相差で変動する。

(3) スクリーチ音の基本周波数は、過圧縮域の8の字変動の振動数と一致する。したがって、スクリーチ音のピークの発生は、周期変動する衝撃波の挙動に起因すると思われる。

(4) 超音速域においても離散周波数分布のピーク群の周波数は、基本周波数の整数倍となる。

文 献

- (1) Powell, A., *Proc. Phys. Soc. Am.*, 66B(1953), 1039-1056.
- (2) Bishop, K. A., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, 50-1(1971), 21.
- (3) 児島・楊・島津江・松岡, 機論, 61-585, C(1995), 1804-1809.
- (4) 児島・島津江・松岡・楠井, 機論, 62-594, B(1996), 637-644.

Fig.5 Frequency spectrum of jet noise