119 渦輪構造のジェット騒音に及ぼす影響

近畿大工 児島忠倫, 近畿大工 島津江麻里[○]
近畿大理工 松岡祥浩, 東洋アルミ 楠井 潤

Effect of Structure of Vortex Rings on Jet Noise

Tadatomo KOJIMA *, Mari SHIMAZUE *,
Yoshihiro MATSUOKA ** and Jun KUSUI ***

In this report, it was discussed by the digital image processing that the characteristics of the discrete frequency noise for subsonic jets were closely related to the structure and behavior of vortex rings. The vortex rings released from nozzle with exit divergent angle were visualized by Schlieren method or a high-speed video camera included its system. It was clarified that the interaction of vortex rings were classified into phenomena of chasing, merging and rolling up and so on, and those phenomena had characteristic frequency distributions of noise respectively.

1. 緒言

離散周波数を伴った低速ジェットに生じる空力音響特性は、フィードバック機構⁽¹⁾の存在により論じられているが⁽²⁾⁽³⁾, 渦輪の構造や挙動も密接に関連していると思われる。円形ジェット中の渦輪の成長から崩壊に至る過程での挙動に関する研究では、合体现象やロールアップ現象についての報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾が見られる。しかしながら、騒音特性と渦輪構造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ない。本研究は、種々の出口広がり角度をもつノズルから静止大気中へ連続して噴出される亜音速および遷音速ジェットについて、可視化および画像処理により渦輪構造を分析し、渦輪同士の干渉の違いが、離散周波数騒音（ディスクリット音）の周波数分布に及ぼす影響について明らかにしたものである⁽⁶⁾。

2. 実験装置および方法

ノズルは、全長 46 mm, 内径 9.2 mm のストレート管に $\theta = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ の出口広がり角度を設けたものを使用した。実験は、よどみ圧力 P_0 と大気圧 P_a との比 P_0/P_a が $6.0 \times 10^{-3} \sim 1.0$ の範囲で行っている。ノズルから周期的に放出される渦輪は、シュリーレンシステムに組み込んだハイスピードビデオカメラ（記録速度：40,500 こま/sec, フレームインターバル：約 $25 \mu s$ ）で連続撮影され、その構造と挙動が、画像処理によって調べられた。なお、渦輪間の距離や移流速度の計測には、約 50 ~ 70 フレームの 2 値化画像を用いている。

3. 実験結果および考察

3・1 渦輪の合体现象 Fig.1(a) ~ (d) に、 $\theta = 15^\circ$ のノズルから圧力比 $P_0/P_a = 0.600$ で放出された渦輪のノズル出口付近での挙動を示す。なお、これらは、画像処理によって

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

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

***Toyo Aluminium K.K., Aioicyo 4-1, Yao, Osaka 581, Japan

画質改善された鮮鋭化画像である。Fig.1 (a)に示すように、ある時刻において噴出直後の第1渦輪とその下流側に先行する第2渦輪がそれぞれ観察される。時間の経過に伴って第1渦輪は、Fig.1(b), (c)に示すように第2渦輪に接近し、やがてFig.1(d)に示すように二つの渦輪は合体する。Fig.1には見られないが、27,000コマ/secで撮影した画像では、第1, 2渦輪の下流に合体渦輪が先行する渦輪構造となっている。そして、第1, 2渦輪が新たに合体する前に、合体渦輪は消滅する傾向にある。このような渦輪の合体現象は、 $\theta = 15^\circ$ のノズルのディスクリット音の発生したすべての場合に見られた。

Fig.2に、 $\theta = 15^\circ$, $Po/Pa = 0.628$ におけるディスクリット音のパワースペクトルを示す。基本周波数の第1ピークと高周波成分に音圧レベルSPLの高い数個のピークが発生している。また、第2ピークは第3ピークよりも低い。多くの可視化写真や2値化処理画像から、渦輪の合体現象が見られる場合には、Fig.2に示すような高周波数側で鋭いピーク群の発生する離散周波数分布になりやすいことがわかった。また、第2ピークは、圧力比の増大につれて、消滅する傾向にある。

Fig.3に、 $\theta = 15^\circ$, $Po/Pa = 0.597$ の渦輪の移流速度 U_ω の分布を示す。渦輪

の移流速度は、2値化画像から渦輪の重心位置の移動距離を求めることにより算出した。なお、横軸の X/d は、ノズル出口から噴出方向への水平距離をノズル内径で無次元化したものである。第1渦輪は、先行する第2渦輪に誘引されて崩壊、消滅する $X/d = 1$ 付近までほぼ直線的に加速している。第2渦輪の移流速度は、約100 m/sとかなり低いが、 $1.5 \leq X/d \leq 2$ で第1渦輪と合体して速度エネルギーが増大するために、合体渦輪の移流速度は、約150 m/s付近まで上昇する傾向にある。

Fig.1 Merging phenomenon of vortex rings,
 $\theta = 15^\circ$, $Po/Pa = 0.600$

Fig.2 Frequency spectrum of jet noise,
 $\theta = 15^\circ$, $Po/Pa = 0.628$

Fig.3 Phase speed of vortex rings,
 $\theta = 15^\circ$, $Po/Pa = 0.597$

Fig. 4 に, $\theta = 15^\circ$, $Po/Pa = 0.597$ における第 1, 2 渦輪の重心までの無次元距離 X_1/d , X_2/d と無次元化した渦輪間の距離 λ_w/d の分布を示す. 第 1 渦輪と第 2 渦輪間の距離は, 合体现象のために, 下流方向にいくにつれて減少しており, $\lambda_w/d = 0$ 上にある合体渦輪は, $1.5 \leq X_1/d \leq 2$ の範囲に存在している. 第 2 渦輪と合体渦輪間の距離は, $\lambda_w/d \approx 2 \sim 2.5$ と比較的大きいために, 渦輪同士の干渉はほとんどないものと思われる. なお, Fig. 1 および Fig. 4 で示した渦輪の合体位置は, 圧力比の増大に伴って上流方向へ移動する傾向にある.

3. 2 渦輪の追跡現象 Fig. 5(a) ~ (d) に, $\theta = 10^\circ$ のノズルから圧力比 $Po/Pa = 0.462$ で放出された渦輪のノズル出口付近での挙動を示す. なお, これらは, 画質改善後の濃淡画像に 2 値化処理を行ったものである. Fig. 5(a) に示すように, ある時刻においてノズル出口部の第 1 渦と, その下流側に先行する第 2 渦がそれぞれ観察される. 時間の経過に伴って, 第 1 渦輪が Fig. 5 (b), (c) に示すように第 2 渦輪に接近するため, 二つの渦輪間距離は狭まるが, 次の瞬間には, 第 1 渦輪は, Fig. 6(d) のように第 2 渦輪の上流側で消滅する.

この場合, 二つの渦輪に合体は生じない. このような渦輪の追跡現象は, $0.46 \leq Po/Pa \leq 0.63$ で観察され, 第 1 渦輪が消滅する位置は $X/d \approx 0.9$, そのときの第 2 渦輪の位置は $X/d \approx 1.5$ となった.

Fig. 6 に $\theta = 10^\circ$, $Po/Pa = 0.502$ におけるディスクリート音のパワースペクトルを示す. 基本周波数の第 1 ピークと 30 kHz 付近のピークの間, 音圧レベル SPL の低いピーク成分がいくつか現れている. 渦輪の追跡現象が見られる騒音のスペクトルは, Fig. 6 のような離散周波数分布になる傾向がある. これは, 第 1 渦輪すなわち追跡渦輪が先行渦輪と合体する前に消滅するために, 渦輪同士の干渉が弱くなることに起因していると思われる.

Fig.4 Distance of vortex rings,
 $\theta = 15^\circ$, $Po/Pa = 0.597$

Fig.5 Chasing phenomenon of vortex rings,
 $\theta = 10^\circ$, $Po/Pa = 0.462$

Fig.6 Frequency spectrum of jet noise,
 $\theta = 10^\circ$, $Po/Pa = 0.502$

3・3 渦輪のロールアップ現象

Fig.7, Fig.8に、 $\theta = 10^\circ$ のノズルの圧力比 $Po/Pa = 0.746$ と $\theta = 30^\circ$ のノズルの圧力比 $Po/Pa = 0.282$ における瞬間的な流れの可視化写真（せん光時間 $1\mu s$ ）を示す。第1渦輪のすぐ下流側で主流が絞られ、渦輪が急激に巻き上げられるロールアップ現象が見られる。

Fig.9に、 $\theta = 30^\circ$ 、 $Po/Pa = 0.296$ におけるディスクリート音のパワースペクトルを示す。基本周波数に狭帯域の鋭いピークをもつ分布となっている。渦輪のロールアップ現象が見られる $\theta = 10^\circ, 30^\circ$ のある圧力比の範囲では、Fig.9に示すような狭帯域で単一ピークをもつ高調波成分の発生しにくい離散周波数分布となる傾向がある。これは、ロールアップ現象のために、渦輪の干渉が弱くなることに起因しているものと思われる。

4. 結言

出口広がり角度が $10^\circ \sim 30^\circ$ のノズルから亜音速および遷音速で噴出されるジェットについて、離散周波数騒音特性と渦輪構造の挙動が相互に及ぼす影響を可視化と画像処理によって調べ、以下の知見を得た。

(1) 噴流中の渦輪構造を渦輪の干渉の違いにより、合体現象、追跡現象、ロールアップ現象の三つに分類した。渦輪の合体現象は出口広がり角度 15° のノズルで、追跡現象は 10° のノズルで、ロールアップ現象は 10° および 30° のノズルで、特定の圧力比の場合に観察された。

(2) 渦輪の合体現象、追跡現象、ロールアップ現象が発生する場合のディスクリート音の離散周波数は、それぞれの現象に特有の分布となる。

文 献

- (1) Powell, A., *Proc. Phys. Soc. Am.*, 66B(1953), 1039-1056.
- (2) 倉澤・小幡・平田・笠木, 機論, 53-488, B(1987), 1254-1260.
- (3) 朴・望月・木谷, 機論, 59-565, B(1993), 2756-2761.
- (4) Hussain, A. K. M. F., *J. Fluid Mech.*, 173(1986), 303-356.
- (5) 栗間・宮本・笠木・平田, 機論, 60-574, B(1994), 2007-20130.
- (6) 児島・楊・島津江・松岡, 機論, 61-585, C(1995), 1804-1809.

Fig.7 Rolling up phenomenon of vortex rings,
 $\theta = 10^\circ$, $Po/Pa = 0.746$

Fig.8 Rolling up phenomenon of vortex rings,
 $\theta = 30^\circ$, $Po/Pa = 0.282$

Fig.9 Frequency spectrum of jet noise,
 $\theta = 30^\circ$, $Po/Pa = 0.296$