非対称な不足膨張噴流中に発生する擬似衝撃波構造の解明* (単一噴流の定常特性について)

児島 忠倫^{*1}, 劉 渝^{*2}, 井上 純一^{*3}

Study on Structure of Pseudo-Shock Waves in Asymmetric Under-Expanded Jet (Steady Characteristics of a Single Jet)

Tadatomo KOJIMA^{*4}, Yu LIU and Junichi INOUE

^{*4} Department of System Design Engineering, Kinki University,
1 Umenobe, Takaya, Higashihiroshima-shi, Hiroshima, 739 2116 Japan

The purpose of this study is to clarify the structure of pseudo-shock waves in under-expanded jet issuing from asymmetric nozzle with an oblique outlet. In particular, the steady characteristics of a single jet flow were studied. The flow was visualized by the shadowgraph method and the mean pitot pressures were measured. It was clarified that the asymmetric under-expanded jet was deflected by the stagnation pressure. As a result, it was found that the structure of pseudo-shock wave was affected considerably by the stagnation pressure in an air chamber and the outlet angle of nozzle, and consequently the structure of the pseudo-shock waves were different from the axisymmetric under-expanded jet.

Key Words: Supersonic Flow, Compressible Flow, Shock Wave, Flow Visualization, Asymmetric Nozzle, Under-Expanded Jet, Pseudo-Shock Waves

1. 結 言

不足膨張噴流中に発生する擬似衝撃波は、工業上、よく見かける現象であり、その構造ならびに挙動を解明することは重要なことである。しかしながら、このような噴流中に発生する擬似衝撃波の構造や噴流の自励振動に関する研究はほとんど見られない。

著者らは今までに、長い助走距離をもつ直円管から噴出される不足膨張噴流中に発生する擬似衝撃波の構造についての研究を行っている。特に、擬似衝撃波の長さや不足膨張噴流内の静圧分布と速度分布との関連性⁽¹⁾⁽²⁾を詳細に調べ、定常的な擬似衝撃波の構造を明確にしている。また、瞬間的な流れの可視化と全圧変動、および静圧変動の測定を行って、自励振動現象⁽³⁾についてもある程度明確にしている。さらに、出口広がり角度をもつノズルから噴出される超音速噴流における渦輪の挙動⁽⁴⁾⁽⁵⁾や、超音速噴流における衝撃波の挙動が離散周波数騒音に及ぼす影響⁽⁶⁾を明確にしておき、流れの非定常性について言及している。

本研究は、助走距離が短く、出口部が斜めに切り落とされた非対称ノズルから噴出される不足膨張噴流内の擬似衝撃波の構造とその挙動について、定常的な特性、ならびに非定常的な特性を解明することを目的としている。このようなノズルは、ノズルの出口部の形状が重要視されている繊維ノズルやアトマイズノズルの研究開発への応用、ジェット推力を要する飛行物体の姿勢制御への応用、あるいは高圧の流体機器などへの応用があり、工業上、また、工学上においても有益で興味のある研究である。特に、本報告では、単一の非対称ノズルから静止大気中に噴出される不足膨張噴流の定常特性について、ノズル出口部の切り口角度の変化に対する圧力の違いが、擬似衝撃波の構造に及ぼす影響を調べたものである。

2. 記 号

本論文で用いたおもな記号は、次のとおりである。

d : ノズル内径

α : ノズルの切り口角度

P_o : よどみ圧力 (ゲージ圧)

P_a : 大気圧

X : 噴流中心軸上のノズル出口からの距離

* 原稿受付 2003年8月7日。

^{*1} 正員, 近畿大学工学部(〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1)。

^{*2} 正員, 近畿大学大学院。

^{*3} 正員, ヤマハ発動機(株)(〒438-8501 磐田市新貝2500)。

E-mail: kojima@hiro.kindai.ac.jp

Y : X 軸からの水平方向の距離

Z : X 軸からの垂直方向の距離

X_0 : ノズル中心軸のノズル出口からの距離

X_L : 擬似衝撃波の長さ

θ : ノズル中心軸と噴流中心軸とのなす角度 (噴流の偏角)

P_t : X 軸方向の流れのピトー圧 (ゲージ圧)

3. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略図を示す。オイルレスコンプレッサーによって圧送された空気は、吸音室内に取り付けられた非対称ノズルから静止大気中に連続的に噴出される。噴流の可視化にはシャドウグラフ法を用いて、露光時間 1/60 s で時間平均の流れを撮影した。流れの圧力は、直径 1.1 mm の全圧プローブ⁽¹⁾によって測定した。以下、この圧力をピトー圧と称する。流れは周囲の空気の巻き込みや、衝撃波などの発生によって数十 kHz～数百 kHz の激しい圧力振動を伴っていることを確認しているが、このピトー圧は、時間平均の圧力を示しており、静圧の影響が多分に含まれている。

表1に、使用した軸対称ノズルおよび非対称ノズルの形状を示す。ノズルの長さ L は、ノズル内径 d の5倍とし、出口角度 α が 90° の軸対称ノズルを TP10SA90、出口部の切り口角度が 60° 、 45° 、 30° の非対称ノズルをそれぞれ TP10SA60, TP10SA45, TP10SA30 とした。

実験は、よどみ圧力 P_0 を大気圧 P_a で除した圧力比 P_0/P_a が 2.0～6.0 の領域で行った。なお、 X 軸、 X_0 軸、 Z 軸および噴流の偏角 θ は、図2に示すようにとり、擬似衝撃波の長さ X_L は、多くの可視化写真より衝撃波の消滅する位置を測定して求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 超音速噴流の可視化 図3(a)～(c)のそれぞれに軸対称ノズル TP10SA90 の圧力比 $P_0/P_a=2.0, 4.0, 6.0$ における時間平均の流れの写真を、図3(d)に $P_0/P_a=6.0$ 付近の擬似衝撃波構造のスケッチを示す。図3(a)の $P_0/P_a=2.0$ では、5～6個の軸対称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る。このダイヤモンドセルは、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。図3(b)の $P_0/P_a=4.0$ では、出口部に生じるしゃ断衝撃波と反射衝撃波との接触面よりスリップ面が生じるために、衝撃波群は4個程度と少なくなり、各セル間の長さは長くなる傾向にある。図3(c)の $P_0/P_a=6.0$ では、スリップ面はさらに成長して、下流域まで広がっている。なお、出口直後の噴流境界は、流れの急膨張のために、

Fig.1 Experimental apparatus

Table 1 Shape of nozzles

Symbol	L (mm)	d (mm)	α ($^\circ$)	Shape
TP10SA90	50	10.0	90	
TP10SA60	50	10.0	60	
TP10SA45	50	10.0	45	
TP10SA30	50	10.0	30

Fig.2 Coordinates

バレル形状となっている。図3(d)のスケッチに示すように、軸対称ノズルでは、過膨張域と過圧縮域が形成される。このスリップ面と噴流境界で衝撃波が繰り返し反射しながら、かなり下流域まで複雑な擬似衝撃波の存在する超音速流れとなっている⁽²⁾。

図4(a)～(c)のそれぞれに非軸対称ノズル TP10SA60 の圧力比 $P_0/P_a=2.0, 4.0, 6.0$ における流れの写真を、図4(d)に $P_0/P_a=6.0$ 付近の擬似衝撃波構造のスケッチを示す。図4(a)に示す $P_0/P_a=2.0$ では、軸対称ノズルの場合と異なり、噴流が偏向するためにダイヤモンドセルは形成されない。したがって、軸対称ノズルに見られるような明りょうな過圧縮域や過膨張域は形成されず、斜め衝撃波群が噴流境界層との干渉によって生じ

(a) $Po/Pa=2.0$ (b) $Po/Pa=4.0$ (c) $Po/Pa=6.0$

(d) Structure of flow

Fig.3 Shadowgraph photographs and structure of jet flow, TP10SA90

る擬似衝撃波が形成される。図 4(b)に示す $Po/Pa=4.0$ では、噴流はさらに偏向し、四角形セル形状の衝撃波群から構成される擬似衝撃波となり、過圧縮域および過膨張域が形成される。この四角形セルは、下流域では正方形セル形状に変化している。なお、ノズル出口の噴流の下方に小さなスリップ面が発生しているのが見られる。図 4(c)に示す $Po/Pa=6.0$ では四角形セルを構成する衝撃波群は、下流域では斜め衝撃波群となり、噴流は激しく振動するために、せん断層や噴流境界が不明りようとなる。スリップ面はかなり下流域まで見られるが、その大きさは噴流の偏向が大きくなるために、TP10SA90 の場合よりも小さい。図 4(d)に示す $Po/Pa=6.0$ 付近のスケッチのように、非軸対称ノズルでは、擬似衝撃波の長さは不明りようとなる。

図 5(a)~(c)のそれぞれに非軸対称ノズル TP10SA45

(a) $Po/Pa=2.0$ (b) $Po/Pa=4.0$ (c) $Po/Pa=6.0$

(d) Structure of flow

Fig.4 Shadowgraph photographs and Structure of jet flow, TP10SA60

の圧力比 $Po/Pa=2.0, 4.0, 6.0$ における流れの写真を、図 5(d)に $Po/Pa=6.0$ 付近の擬似衝撃波構造のスケッチを示す。図 5(a)に示す $Po/Pa=2.0$ では、ノズル下方の出口端から斜め衝撃波が生じており、下流域では流れが激しく振動するために、擬似衝撃波の終了付近のせん断層は不明りようとなる。この場合にもダイヤモンドセルは形成されない。図 5(b)に示す $Po/Pa=4.0$ では、3 個程度の明りような四角セルが見られるが、スリップ面は発生しない。図 5(c)に示す $Po/Pa=6.0$ においても、 $Po/Pa=4.0$ と類似の衝撃波群からなる擬似衝撃波が見られ、明りような四角セルが生じる。また、出口下方に弱いスリップ面が発生している。したがって、ノズル切り口角度が鋭くなるほどスリップ面が生じ難くなるとともに、圧力比の上昇によって噴流の偏向が大きくなり現われる傾向にある。また、四角セルの内側では、写

Fig.5 Shadowgraph photographs of jet flow, TP10SA45

真の黒色の影の部分に示すような過圧縮域が生じる。図 5(d)にこれらの様子をスケッチした擬似衝撃波の構造が示されており、基本的には図 4(d)の TP10SA60 の場合と類似の構造となっている。

図 6(a)～(c)のそれぞれに非軸対称ノズル TP10SA30 の圧力比 $Po/Pa=2.0, 4.0, 6.0$ における流れの写真を、図 6(d)に $Po/Pa=6.0$ 付近の擬似衝撃波構造のスケッチを示す。いずれの圧力比においても切り口角度の鋭い 30° のノズルでは、切り口角度 60° や 45° のノズルと異なり、擬似衝撃波の構造にかなりの違いが見られる。図 6(a)に示す $Po/Pa=2.0$ では、ノズル下方の出口端から生じる斜め衝撃波が噴流の境界層と干渉して、多数の不規則な衝撃波群から構成される擬似衝撃波を形成する。図 6(b)に示す $Po/Pa=4.0$ では、ノズル下方の出口端から発生するかなり強い斜め衝撃波が生じ、ノズルの上方からは衝撃波が生じないので、四角セルは生じ難く、

Fig.6 Shadowgraph photographs of jet flow, TP10SA30

自励振動が一段と激しく現れるためにかなり拡散している様子が見られる。図 6(c)に示す $Po/Pa=6.0$ では、ノズルの出口直前で閉そく現象が生じ難いので、図 3(c)の $Po/Pa=6.0$ に示したようなノズル出口部での流れの急膨張はなく、噴流の境界層に明りょうな形の形状は見られない。したがって、ノズルの出口部のノズル下方からのしゃ断衝撃波と上方からの弱いしゃ断衝撃波の交差点から生じる反射衝撃波によって 1 個の四角セルが生じるが、その後方では流れは振動拡散して急激に亜音速に減じてしまう。また、いずれの圧力比においてもスリップ面は生じない。なお、図 6(d)に示すように、可視化および圧力分布の測定から、わずかながら過圧縮域と過膨張域の存在が認められる。

4.2 噴流の偏角と擬似衝撃波の長さ 図 7, 図 8 に示す噴流の偏角と擬似衝撃波の長さについては、エラーバーで示すほどのばらつきはないので、平均値を

示している。

図7にノズルTP10SA60, A45, A30における噴流の偏角 θ と圧力比 Po/Pa との関係を示す。噴流が偏角するのは、可視化写真に見られるように、ノズル出口部の噴流の下方における圧力がノズル上部の噴流の圧力よりも大きい状態で噴出されるための圧力差に起因しているものと考えられる。いずれのノズルとも圧力比の増加に伴って噴流の偏角は増加する傾向にある。 $2.0 \leq Po/Pa < 3.0$ の領域では、ノズル出口部における噴流上下の圧力差が小さいために、ノズルの切り口角度の違いによる差異はほとんど見られない。しかし、 $Po/Pa > 3.0$ においては、出口部における噴流上下の圧力差が大きくなるので、ノズルの切り口角度の違いによって噴流の偏角に差異が生じている。ノズルの切り口角度の鋭いTP10SA30においては、圧力比の増加にともなってほぼ単調に増加する傾向が見られ、偏角はもっとも大きく現われている。また、切り口角度の鈍角なノズルでは、圧力比の大きいところでは噴流の偏角は増加する割合が減少し、TP10SA60では、 $Po/Pa > 5.0$ において、噴流の偏角にほとんど違いは見られない。

図8にTP10SA90, A60, A45, A30における擬似衝撃波の無次元の長さ X_L/d と圧力比 Po/Pa との関係を示す。TP10SA90の対称ノズルとTP10SA60の場合には、圧力比の増加とともにほぼ直線的に増加しているが、TP10SA60のノズルがもっとも長く現れている。これはTP10SA90よりもノズル出口断面が大きく、また、TP10SA45, A30よりも噴流の自励振動による拡散が少ないためと考えられる。TP10SA45の場合には、 $Po/Pa=5.0$ 付近までは、TP10SA90のものとほとんど同じで直線的に増加する。それ以上の圧力では、Fig.7に示すように、噴流偏角に大きな差異がなく噴流構造にほとんど違いがないので、擬似衝撃波の長さに変化は見られない。TP10SA30の場合には、圧力比の増加とともに噴流の偏角が他のノズルよりも大きく自励振動が顕著であるために、拡散が激しく亜音速に急減してしまう。そのために擬似衝撃波の長さは、最も短く現われている。

4.3 噴流中心軸上のピトー圧分布 図9にTP10SA30の圧力比 $Po/Pa=2.0, 4.0, 5.5$ における噴流中心軸上 X/d のピトー圧 P_t の分布を示す。 $Po/Pa=2.0$ では、斜め衝撃波が弱いために小さな圧力変動となっている。 $Po/Pa=4.0$ と 5.5 における極大値を示す第1ピークは、斜め衝撃波の前方の圧力上昇によるものであり、第2ピークの極大値は、第2セルの過圧縮域で生じる圧力上昇である。なお、これらの圧力上昇は、全圧によるものではなく、静圧の影響が主原因であると推測される。第1, 2ピークの極小値は過膨張によって生じたもので

Fig.7 Angles of central axis of jet flow against nozzle axis

Fig.8 Lengths of pseudo-shock wave

Fig.9 Pitot pressure distributions along central axis of jet flow, TP10SA

ある。図中の矢印は、擬似衝撃波の長さを示したものであり、圧力振動の下流において擬似衝撃波が消滅する。圧力比が大きくなるほど、圧力振動の振幅は大きく現れ、擬似衝撃波の消滅する上流側の圧力の急低下は、ノズルの切り口角度が鋭角になるほど顕著である。

4・4 Z軸方向ピトー圧分布と立体等ピトー圧図 図10にTP10SA30の圧力比 $Po/Pa=5.5$ におけるZ軸方向のピトー圧 P_t の分布を示す。横軸は、無次元の距離 Z/d を示す。 $X/d=0.5$ では、 $Z/d=0.2$ 付近で急激な圧力低下が見られるが、これは、ノズル出口部から生じるしゃ断衝撃波で囲まれた急膨張の領域のためである。 $Z/d=0.5$ のノズル下方においては、ノズル内での圧力が十分に膨張していないので、圧力はノズルの上方より大きく現われている。 $X/d=3$ では、過膨張域のために凹形の分布となる。 $X/d=5$ 以降の下流域では、凸形の分布となるが、ノズル下方の圧力が大きく現れる傾向にある。

図11(a), (b)にそれぞれTP10SA30、圧力比 $Po/Pa=5.5$ の $X/d=1.0$ と 5.0 の立体等ピトー圧図を示す。右側に噴流軸に垂直なY-Z断面の等ピトー圧図を示す。図11(a)に示すように、 $X/d=1.0$ においては、ノズル上方側でピトー圧は大きく現れている。Y-Z断面の噴流形状は、長円形となっている。図11(b)に示す $X/d=5.0$ の立体等ピトー圧図は、図6(c)からわかるように四角セル後方の2辺を構成する反射衝撃波の下流での分布を示している。したがって、図10に示した分布のように凸形の分布となっている。Y-Z断面の噴流形状は、 $X/d=1.0$ のものよりかなり長円形となっていることがわかる。

5. 結 言

非対称ノズルから噴出される不足膨張噴流中に生じる擬似衝撃波構造の定常特性について、以下の知見を得た。

(1) 軸対称ノズルから噴出される軸対称な噴流では、ダイヤモンドセルが形成されるが、切り口角度の鋭い非対称ノズルから噴出される非対称噴流では、四角セルが形成され、スリップ面の発生し難い、あるいは発生しない流れとなる。

(2) 圧力が大きくなるほど噴流の偏角は増大するが、切り口角度の大きいノズルでは偏角はさらに増大する。

(3) 噴流軸に垂直な噴流断面は、切り口角度が鋭く、また、下流域になるほど長円形となる。

文 献

- (1) 児島忠倫・松岡祥浩, 機論, 52-477, B(1986), 2021-2027.
- (2) 児島忠倫・松岡祥浩, 機論, 53-495, B(1987), 3146-3151.
- (3) 児島忠倫・松岡祥浩, 機論, 54-502, B(1988), 1286-1291.

Fig.10 Pitot pressure distributions on Z axes, TP10SA30, $Po/Pa=5.5$

(a) $X/d=1.0$

(b) $X/d=5.0$

Fig.11 Distributions of equi-pitot pressure on Y-Z area, TP10SA30, $Po/Pa=5.5$

- (4) 児島忠倫・楊京龍・島津江麻里・松岡祥浩, 機論, 61-585, B(1995), 1804-1809.
- (5) 児島忠倫・島津江麻里・松岡祥浩・楠井潤, 機論, 62-594, B(1996), 637-644.
- (6) 児島忠倫・嶺間沢秀孝・高田益臣・松岡祥浩, 機論, 65-629, B(1999), 78-85.