

# 変形おさ補助ノズル方式 エアジェットルームにおける流れ特性

(第1報) メインノズル内の流れ

旭化成工業 石 田  
金沢大学 岡 島

稔\* (会員)  
厚\*\*

## A Flow Characteristics of an Air Jet Loom with a Modified Reed and Auxiliary Nozzles Part 1 : Flow in a Main Nozzle

Minoru Ishida\*, Atsushi Okajima\*\*

\*Textile Research Laboratory, Asahi Chemical Industry Co., Ltd., Osaka

\*\*Faculty of Technology, Kanazawa University, Kanazawa, Ishikawa

### Abstract

As a basic study for improving the insertion properties of an air jet loom with a modified reed and auxiliary nozzles, we measured the static pressure of the main nozzle, changing the nozzle tank pressures and the length of the acceleration tube, and calculated the nozzle flow velocity and Mach numbers. The following results are obtained:

- (1) Flow may reach the critical condition of Mach number of unity at the two positions in a main nozzle: one of them is the needle tip and the other is the acceleration tube exit. An increase in the tank pressure brings about the critical throat condition at the two positions above and the flow in the main nozzle is completely characterized.
- (2) Tank pressure  $P_T$  at which the flow reaches the critical condition at the needle tip is dependent upon the acceleration-tube length; the longer the length, the higher  $P_T$  becomes.
- (3) The tank pressure  $P_T$  at which the flow reaches the critical conditions at the exit of the acceleration-tube remains constant independently of the acceleration-tube length. For the present nozzles used critical tank pressure is  $P_T = 4 \text{ kgf/cm}^2$ .
- (4) Shock waves are generated in the acceleration tube of 70 mm long.

(Received June 5, 1990)

### 摘 要

本研究では、変形おさ補助ノズル方式 AJL の緯入れ性能の向上を目的とした基礎的研究として、メインノズル管内の流れを非圧縮性流体の一次元流れとして解析するとともに壁面静圧を測定して、ノズルタンク圧や加速管長がノズル管内流速の変化に及ぼす影響を明らかにした。得られた結果は次の通りである。

- (1) メインノズル管内流れでは、 $M = 1$  となって臨界状態を示すスロート部が、ニードル先端部と加速管出口部の 2 か所で生ずる可能性があり、タンク圧力を変えることにより、これらのスロート部が発生し、ノズル管内流れの様相が特徴づけられる。
- (2) ニードル先端部が臨界状態になるノズルタンク圧力  $P_T$  は加速管長に依存し、加速管長が長くなるほど  $P_T$  は高い。
- (3) 加速管出口が臨界状態になるノズルタンク圧力  $P_T$  は、加速管長にかかわらずほぼ一定で、本実験の範囲のノズルでは、 $P_T = 4 \text{ kgf/cm}^2$  である。
- (4) 加速管出口が臨界状態になる流れでは、管内流れは常に亜音速の場合と超音速流れを含む場合に分けられ、加速管長の短

いノズルにおいて後者の例が認められる。

(5) 本実験の加速管長  $L = 70 \text{ mm}$  のノズルにおいて加速管内で衝撃波が発生する。

(平成2年6月5日受理)

## 1. 緒言

空気で緯糸を飛走させるエアジェットルーム (AJL) は、近年紡績系やセルロース系長繊維の製織合理化用織機としてめざましい進歩をとげており、特に、より高速化、広幅化等の高生産性を目指した織機開発が積極的に進められている。

AJL の緯入れ方式は、メインノズルから出た空気の拡散防止から、エアガイド方式と補助ノズル変形箆方式の2つに大別される。いずれの方式においても、メインノズルは緯糸飛走性に大きな影響を及ぼすことから、その性能の向上は、AJL 開発の重要な課題であるといえる。

そのためのメインノズルの研究は古くから行われ、宇野、石田<sup>1)</sup>らは、メインノズルの構造の異なるノズルを試作しノズル出口での風速や緯糸飛走距離から形状の適正化を検討している。また、メインノズルの性能を取り扱った研究には、Duxbury<sup>2)</sup>の研究があり、ノズルから噴射された空気の流れ分布や緯糸に働く張力、さらには自由大気中に噴射された空気の流れの挙動を推察する程度<sup>3)</sup>である。

この他、メインノズルの出口速度が音速以上になる場合の流速測定から性能を評価するものとして Ström<sup>3)</sup> や Lyubovitskii<sup>4)</sup> らの研究がある。

いずれにしても、AJL のメインノズルに関する研究は比較的少なく、いずれもノズル加速管から噴射された管外流の流速分布を解析することにより性能を評価するもの<sup>5)</sup>がほとんどである。管内流については、ノズルの緯糸牽引力の大きさを間接的にノズル内の流れの挙動を推察する程度<sup>6)</sup>である。

一方、ノズルからの噴流は、ノズルの内部の構造や形状にも強く依存するので、ノズル管内の流れ特性を知ることは重要である。また、実際にノズルが緯糸を牽引する際には、ノズルの管外流だけでなく管内における流れ状態も、糸の飛走特性に大きな影響を与えるものと考えられる。

特に、高速化、広幅化に適した変形箆補助ノズル方式 AJL のメインノズルは、エアガイド方式の AJL に比べ、加速管の管長が長く口径が小さいにもかかわらず、生産性の向上をはかる目的から、一般

にその噴射空気圧を高く設定する。このため前記方式の AJL のメインノズルは、使用条件によっては、ノズル内の流速がスロート部 (最小断面積部) で音速に達し、その性能が十分に発揮されていないことも予想される。

そこで、本研究は、変形箆補助ノズル方式 AJL のメインノズル管内の流れについて、圧縮性を考慮した一次元流れとしてタンク圧力条件やノズル内部形状を変えて解析し、ノズル管内局部壁面静圧などの実験結果と比較検討し、ノズル性能の向上をはかることを目的とする。

## 2. 記号

本報で用いる記号をまとめて示す。

$A$  : 管の断面積 [ $\text{m}^2$ ]

$A_s$  : 検査体積の周囲面積 [ $\text{m}^2$ ]

$a$  : 音速 [ $\text{m/s}$ ]

$c_p$  : 定圧比熱 [ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ]

$c_v$  : 定容比熱 [ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ]

$D$  : 加速管の内径 [ $\text{mm}$ ]

$f$  : 摩擦係数 [-]

$h$  : エンタルピー [ $\text{J/kg}$ ]

$k$  : 比熱比  $c_p/c_v$  [-], 断熱変化の場合  $k = 1.4$

$L$  : 加速管の長さ [ $\text{m}$ ]

$M$  : マッハ数 [-]

$m$  : 質量流量 [ $\text{kg/s}$ ]

$\tau_w$  : 壁面せん断応力 [ $\text{N/m}^2$ ]

$P$  : 絶対圧力 [ $\text{N/m}^2$ ]

$P_T$  : ノズルタンク絶対圧力 [ $\text{kgf/cm}^2$ , または  $\text{N/m}^2$ ]

( $P_1, P_2, P_3 \dots$  は図4に示す断面位置 1, 2, 3... の圧力)

$R$  : 気体定数 [ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ]

$T$  : 絶対温度 [ $\text{K}$ ]

$V$  : 流速 [ $\text{m/s}$ ]

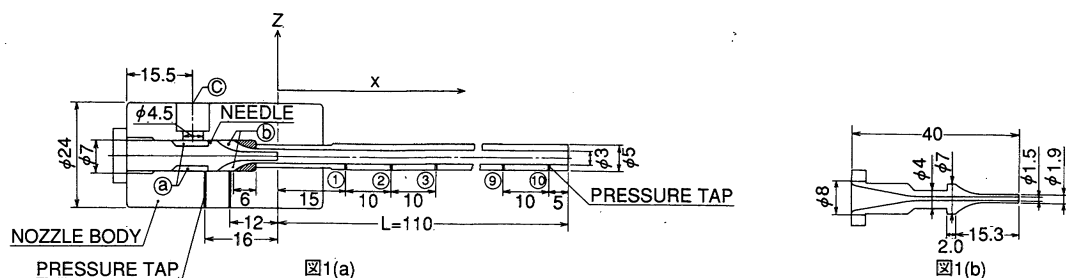
$x$  : ニードル先端からの  $x$  座標

$\lambda$  : 管摩擦係数 [-],  $\lambda = 4f$

$\rho$  : 密度 [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  : 比容積 [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

注) 上記記号の中で  $M = 1$  の臨界状態を示すもの

図1 メインノズルの形状、寸法並びに測定座標軸 ( $L = 110$  mm)

については添字\*を付けて表す。

### 3. 実験装置と測定方法

#### 3.1 メインノズル

図1に本実験で用いたメインノズルの寸法形状を示す。このノズルはフィラメント仕様を基本として新たに製作したもので、ノズル本体、ニードル、加速管の3つの部品で構成されている。

図1(b)に示すようにニードルは、その中心部に緯糸導糸路を有し、その先端部は先細テーパ状に加工されノズル本体に挿入されている。ノズル本体の空気挿入口〔図1(a)の◎〕から入った圧縮空気は、第1空気たまり部③からニードルの外周に沿って流れ、ニードル外周表面に放射状に配置した整流子の間を通過した後、第2空気たまり部⑥を経てテーパ流路を進む。テーパ流路ではニードルの先端へ進むに従い、流路面積が狭くなる。

その後、流れは加速管内に入るため流路が急激に拡大される。加速管内の流れは、管径が一定であることからファノー流れとなり、最終的に、加速管出口より大気中へ放出される。

図1に示す基本メインノズルの各部の主な寸法はニードル先端部外径  $d = 1.9$  mm、内径 1.5 mm、加速管内径  $D = 3.0$  mm、加速管長  $L = 110$  mm である。

なお、図1(a)に示すメインノズル本体並びに加速管には壁面静圧測定のための  $0.8$  mm $\phi$  の静圧測定孔が図に示す位置に設けてある。すなわち、ニードル先端を原点として、図1(a)でノズルボディ第1、第2空気たまり部に、 $x = -16$  mm と  $-12$  mm の位置、並びに加速管上、 $x = 15$  mm の位置①から、 $10$  mm 間隔で②、③……⑩合計12か所である。圧力測定時には所定の測定孔以外の孔はふさいで用いる。

本実験では、 $L = 110$  mm 加速管のノズルについて主に実験したのでこれを基準ノズルとし、他に、 $L = 50$  mm,  $70$  mm,  $170$  mm の加速管についても実験を行った。なお、管長  $L$  以外の寸法や形状はすべて同一であるが、加速管長  $L = 70$  mm のものについては、 $5$  mm の細かい間隔で静圧測定孔を設置してある。

#### 3.2 空気流速、流量並びに圧力の測定方法

圧縮空気は、図2に示すように空気源であるコンプレッサーからエアフィルター、レシーバー、エアドライヤー、圧力調整器、ノズル空気タンク、ブルドン管圧力計、面積形流量計を通過してメインノズルへ導かれる。また、流れは間欠流ではなく、定常噴射流である。

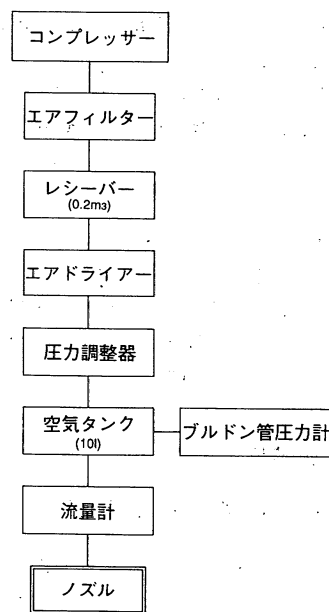


図2 圧力空気供給設備の配置

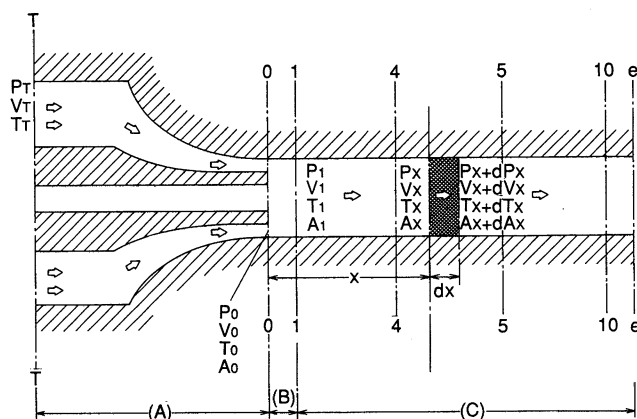


図3 メインノズルの模式図

### 3.3 メインノズル内の圧縮性流体の流れの取り扱い

メインノズルの管内の流れを図3に示すように3つの流れ領域に分けて考える。

- (1) Aの領域は、ノズルボディー内からニードルの先端部までの領域で、「ノズル先細流れ」として取り扱う。
- (2) Bの領域は、ニードル先端からの環状流が、急激に拡散した後、ニードル緯糸導糸通路からの吸引流と混合し、一様な流れになるノズル加速管入口部 ( $x/D = 5$ ) までの領域で、「急拡大管」の流れとして取り扱う。
- (3) Cの領域は、一様混合された加速管入口から出口までの領域で、管壁摩擦のある断面積一定の管内断熱流れ、すなわち、「ファノー流れ」として取り扱う。

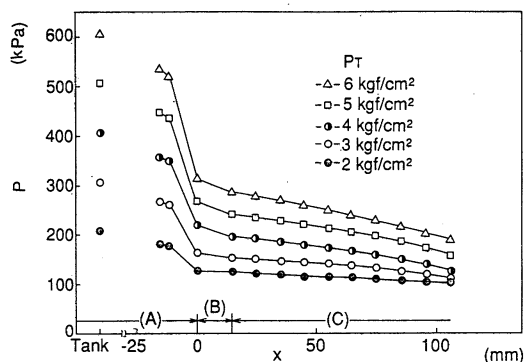
以上の取り扱いのもとに、各ノズル領域について、ノズルへの空気取入口の直前に設置した空気タンクの条件を上流よどみ点として、管内の各部分の壁面静圧結果からノズル管内流れを一次元圧縮断熱流れとして解析する（付録参照）。

## 4. 実験結果

### 4.1 基準ノズルの管内流れ分析

図4に、ノズル入口から出口までの各ノズル断面における壁面静圧  $P$  の分布をノズルタンク圧（絶対圧力） $P_T = 2 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$  について示す。

表1に、上記壁面静圧の測定値から付録に示す計

図4 基準ノズルにおける管内壁面静圧分布 ( $L = 110 \text{ mm}$ )

Tank: ノズルタンク

算法に基づき、各ノズル断面における流れの諸量を求めた結果を示す。図5(a)には、各ノズル断面の壁面静圧  $P$  とノズルタンク圧力  $P_T$  との、比  $P/P_T$  を、図5(b)にはマッハ数の分布を示す。

以下、両図を対応させながらノズル内の流れを考察する。

#### 4.1.1 領域Aの流れ

本実験に用いた基準ノズルでは、図5(a)に示すように空気タンクからニードル先端部へ進むにつれ、壁面静圧が徐々に減少し、空気は流れ方向に徐々に加速される。従って、図5(b)に示すようにニードル先端部の断面積最小部 ( $X/D = 0$ ) でマッハ数が最大となる。

空気タンク圧力  $P_T$  を順次高くしていくと、ノズル第2空気たまり部までの流速はほとんど変化しないが、それ以降ニードル先端に至る流れはノズルタ

表1 基準ノズルの管内壁面静圧の測定値から算出した流れの諸量 ( $L=110\text{mm}$ )

ノズルタンク圧力	X座標	ノズル タンク	-16	-12	0	15	45	75	105
絶対値 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	測定値と 流れの諸量								
2	測定値 P (hPa)	202.6	178.4	173.4	123.0	123.0	117.16	110.5	103.3
	M	0	0.88	0.86	0.88	0.55	0.58	0.61	0.65
	流れの T (K)	296	256.29	258.16	256.0	279.17	277.58	275.62	273.13
	諸量 V (m/S)	0	301.05	275.71	281.13	183.88	192.37	202.35	206.48
	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	2.83	1.66	1.69	1.67	2.06	2.03	1.99	1.95
3	測定値 P	303.9	265.6	258.4	160.5	152.88	141.82	127.42	107.96
	M	0	0.87	0.85	1.0	0.66	0.71	0.78	0.91
	流れの T	296	258.08	258.62	246.57	272.28	269.10	263.89	250.34
	諸量 V	0	279.63	274.02	314.86	218.30	232.49	245.00	287.04
	$\rho$	3.58	2.52	2.55	2.27	2.90	2.82	2.68	2.45
4	測定値 P	405.2	357.4	344.68	214.06	193.14	177.54	155.95	123.69
	M	0	0.88	0.85	1.0	0.70	0.75	0.84	1.04
	流れの T	296	256.294	258.62	246.70	269.92	265.98	259.23	243.76
	諸量 V	0	282.41	274.02	314.0	187.57	245.53	271.96	323.93
	$\rho$	4.77	3.33	3.40	3.02	3.787	3.65	3.42	2.94
5	測定値 P	506.5	445.1	430.6	267.58	237.39	221.26	194.02	154.62
	M	0	0.88	0.85	1.0	0.71	0.75	0.84	1.03
	流れの T	296	256.29	258.62	246.6	269.23	265.92	258.93	244.09
	諸量 V	0	282.41	274.02	314.9	231.90	245.83	271.60	322.90
	$\rho$	5.96	4.16	4.25	3.78	4.70	4.56	4.28	3.48
6	測定値 P	607.8	534.2	516.8	321.10	284.70	261.95	229.90	186.2
	M	0	0.88	0.85	1.0	0.74	0.77	0.86	1.03
	流れの T	296	256.29	258.62	246.57	268.96	264.97	257.85	244.01
	諸量 V	0	282.41	274.02	314.86	233.09	249.63	276.83	323.16
	$\rho$	7.15	4.99	5.11	4.54	5.63	5.42	5.07	4.41

ンク圧力  $P_T$  に応じて速くなる。ただし、 $P_T = 3 \text{ kgf/cm}^2$  になると、図 5(b) より最小断面積部 ( $X/D = 0$ ) の流れが  $M = 1$  の臨界状態になり、それ以上ノズルタンクの圧力  $P_T$  を上昇させてもタンクからニードル先端部への流れは変化しない。

これは、図 5(a) よりニードル先端部の最小断面積部圧力  $P_0$  が臨界値、すなわち  $0.5283 P_T$  に達したため、本実験に用いたノズルでは、領域 A においてはニードル先端部が流れの最小断面積部にあたりその上流にスロート部を持たないので、加速管入口 ( $x/D = 5$ ) の圧力  $P_1$  が臨界値より低くなくてもニードル先端部の圧力は臨界値に保たれる。

#### 4.1.2 領域Bの流れ

本実験のノズルでは、ニードル先端スロート部外

径と加速管内径との比、いわゆる拡大管比が 1.67 と比較的小さいので、ニードルスロート部が亜音速領域では図 3 に示したスロート部断面 0 の圧力  $P_0$  を加速管入口の一樣流れ部断面 1 の圧力の実測値  $P_1$  と等しいと仮定し、また、音速領域では  $P_0$  が臨界圧力になったものとして流れの諸量を算出した。

ここで、ニードルスロート部を出た流れは、ノズルのノズルタンク圧  $P_T$  によっても若干異なるが、 $L = 110 \text{ mm}$  ノズルでは  $x = 15 \text{ mm}$  以上離れるとニードル中央部から流入する流れと充分混合し、速度分布の欠損部は消滅することが確かめられている<sup>7)</sup>。

そこで、本実験におけるニードル先端部 ( $x/D = 0$ ) の壁面静圧  $P_0$  についてはニードル先端部から

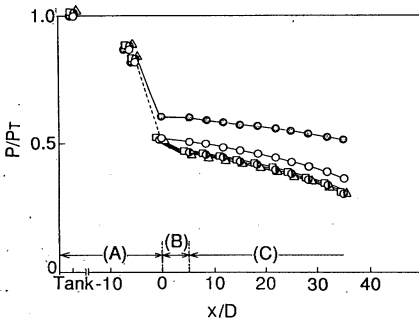


図 5 (a) 基準ノズルにおける  $x$  軸方向管内壁面静圧分布 ( $L = 110$  mm)  
Tank: ノズルタンク

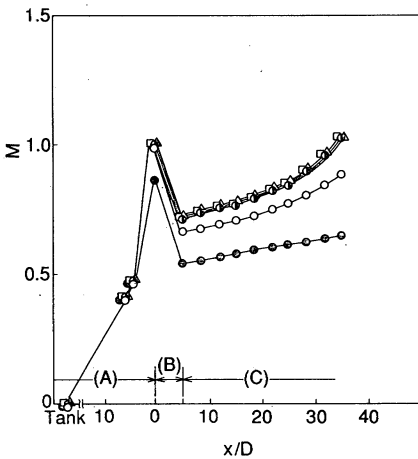
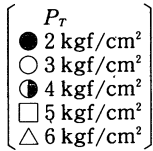
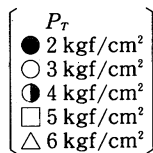


図 5 (b) 基準ノズルにおける  $x$  軸方向管内マッハ数の分布 ( $L = 110$  mm)  
Tank: ノズルタンク



15 mm 離れた加速管入口断面 ( $X/D = 5$ ) の壁面静圧  $P_1$  を測定することにより推定した。以下、領域 B の流れの特徴について詳しく述べる。

図 5 (b) よりこの部分の流れの特徴は急激に拡大されるため、空気タンク圧  $P_t$  を変化させてノズル出口大気圧との比を変えても、加速管入口断面 ( $X/D = 5$ ) のマッハ数はニードルスロート部断面 ( $X/D$

$= 0$ ) のマッハ数よりも低下する。その低下の程度は、 $P_t < 3$  kgf/cm<sup>2</sup> ではノズルタンク圧力が低いほど大きい。なお、ノズルタンク圧力が  $P_t = 4$  kgf/cm<sup>2</sup> になると、加速管入口断面 ( $X/D = 5$ ) での流れはそれ以上圧力を上げて変化しない。前述したニードル先端スロート部 ( $X/D = 0$ ) では、 $P_t = 3$  kgf/cm<sup>2</sup> の圧力で、流れが変化しない臨界状態になったが、それより下流の加速管入口で臨界状態になるタンク圧  $P_t$  は若干高くなる。

#### 4.1.3 領域 C の流れ

本実験に用いた基準ノズルでは、ノズルタンクの圧力  $P_t$  を  $P_t = 2 \sim 6$  kgf/cm<sup>2</sup> まで変化させたが、いずれの条件でも加速管入口断面 ( $X/D = 5$ ) の流速は音速以下となり、また、加速管に沿ってマッハ数は増加している。このマッハ数の増加は、管内摩擦により流れ方向に壁面境界層が発達し、流れの有効断面積が減少するいわゆるファノー流れとなっているためとみられる。

ここで加速管内流れの特徴をみると、ノズルタンク圧力  $P_t$  が 4 kgf/cm<sup>2</sup> になると加速管出口直前の流れが  $M \approx 1$  になり、チョーキング現象を示す。ファノー流れでは入口流速が  $M < 1$  のときは流れの方向にマッハ数が増加していくが、管の途中では  $M = 1$  を越えることができないためチョーキング現象は必ず管の出口で発生する。そのため、加速管入口の流れがいくら速くても、最終的には出口のチョーキング現象に合わせるように入口のマッハ数が調整される。

ここで、本実験の基準ノズルの加速管の管内摩擦係数  $\lambda = 4f$  を求める。一般に、流れをファノー流れと仮定し、管内の任意断面  $a$ ,  $b$  のマッハ数を  $M_a$ ,  $M_b$ , 距離  $L$ , 臨界長さ  $L^*$ ,  $L^*$  とすると、管内摩擦係数は式 (A-10) を用いて、次式より求められる。

$$\lambda \frac{L}{D} = \lambda \frac{L_a^*}{D} - \lambda \frac{L_b^*}{D} = \frac{M_b^2 - M_a^2}{k M_b^2 \cdot M_a^2} + \frac{k+1}{2} \ln \left[ \frac{M_a^2 \{2 + (k-1) M_a^2\}}{M_b^2 \{2 + (k-1) M_b^2\}} \right] \quad (1)$$

そこで、ノズル加速管断面 7 ( $X = 75$  mm) と 10 ( $x = 105$  mm) で管内流れが一定となるノズルタンク圧力  $P_t \geq 4$  kgf/cm<sup>2</sup> について  $\lambda$  を求めると、 $\lambda = 0.008$  となり一般の滑面壁面の管内摩擦係数<sup>8)</sup>  $\lambda = 0.010$  に概略一致する。

次に、この管内摩擦係数  $\lambda = 0.008$  を用い、長さ  $L = 110$  mm の加速管流れにおいて、出口が  $M = 1$  でチョークするときの入口 ( $X = 5D = 15$  mm) の

位置のマッハ数を求める。(1)式において、

$$\lambda = 0.008$$

$$D = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$L = 95 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$M_0 = 1$$

を代入すると、 $M_a = 0.680$  となる。これは、壁面静圧から得た計算値 (0.70 ~ 0.74) と比較的良好一致している。基準ノズル ( $L = 110 \text{ mm}$ ) の場合、ノズルタンク圧力  $P_T \geq 4 \text{ kgf/cm}^2$  では、加速管入口断面 ( $X/D = 5$ ) のマッハ数がほぼ 0.70 ~ 0.74 で一定となり、流れが変化しない。すなわち、加速管出口で流れがチョークするように上流側の流れが調整される。

以上、各タンク圧力ごとのノズル内領域 A, B, C の流れの分析から、AJL における環状メインノズルには、管内に 2 つの場所、すなわち、1 つは、先細流れを示すニードル先端部、他の 1 つは、ファノー流れを示す加速管出口部に、スロート部が生ずる。そして、これら 2 つのスロート部においてノズルタンク圧力により臨界状態の様相が定まり、流れの状態が特徴づけられることが分かる。

すなわち、先に述べた  $L = 110 \text{ mm}$  の基準ノズルの場合は、タンク圧力  $P_T$  を  $3 \text{ kgf/cm}^2$  にすると、管内の最初のスロート部であるニードル先端部がまずチョークし臨界状態になる。そのため、 $3 \text{ kgf/cm}^2$  以上タンク圧力を上げてもスロート部より上流であるタンクからニードル先端までの流れは変化しない。次に、さらにタンク圧力  $P_T$  を上昇させ  $4 \text{ kgf/cm}^2$  にすると、ニードル先端部に加えて、下流側スロート部である加速管出口もチョークし、臨界状態になる。この場合は、タンク圧を  $4 \text{ kgf/cm}^2$  以上あげても基準ノズルではノズル内の全体の流れは変化しないことになる。

#### 4.1.4 ノズル内の質量流量

ノズルの質量流量  $m$  は、一般に下記(2), (3)式で求められる。すなわち、ニードル先端スロート部で流れがチョークしない場合には、

$$m = \frac{P_T A_0}{\sqrt{RT_T}} \left\{ \frac{2k}{k-1} \left\{ \left( \frac{P_0}{P_T} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_0}{P_T} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right\} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

チョークする場合には、

$$m = m^* = \frac{P_T A_0}{\sqrt{RT_T}} \left\{ k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

である。そこで、上式よりノズルタンク圧力  $P_T = 2 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$  についての質量流量を求め、標準大気

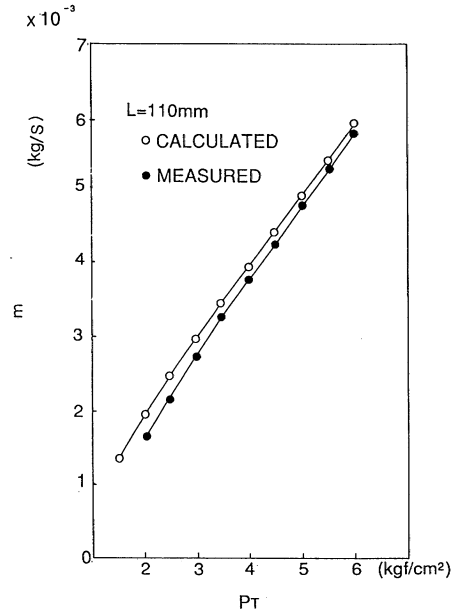


図6 基準ノズルにおけるノズルタンク圧力によるノズル流量の計算値と測定値の比較

圧下での流量に換算した後、基準ノズル入口部で流量計で実測した流量との比較を図6に示す。これより、流量計による測定結果と壁面静圧による計算結果は、タンク圧  $P_T = 2 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$  の全域にわたり比較的良好一致し、本実験の妥当性が確かめられた。ここで、タンク圧力  $P_T$  を高くしていくと前項で述べたようにノズル管内の流れは、2つのスロート部のチョーク状態で特徴づけられるが、流れの質量流量については最初のスロート部であるニードル先端部のチョーク状態に依存して決まる。

#### 4.2 加速管長の異なるノズルの管内流れ

加速管長  $L$  の異なるノズル ( $L = 50, 170 \text{ mm}$ ) について、図7(a), (b), (c)に、ノズルタンク圧力  $P_T$  を  $2 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$  に変えて、管内の無次元静圧の比  $P/P_T$  の分布を示した。また、図8(a), (b), (c)には管内マッハ数の分布を基準ノズル ( $L = 110 \text{ mm}$ ) との比較で示す。図より、いずれの加速管長ノズルにおいても、その管内の流れは、ニードル先端スロート部がチョークする流れとニードル先端部と加速管出口がともにチョークする流れの大きく2つに特徴づけられる。以下、それぞれの流れについて述べる。

##### 4.2.1 ニードル先端スロート部のみがチョークする場合

図7(a), (b)より、いずれの加速管長のノズルでも、

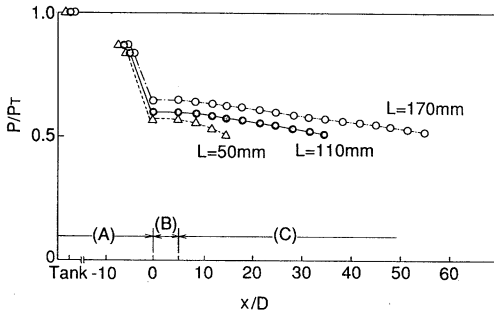


図 7 (a) 加速管長の異なるノズルにおける  $x$  軸方向の静圧分布  
Tank : ノズルタンク  
[ $P_T = 2 \text{ kgf/cm}^2$ ]

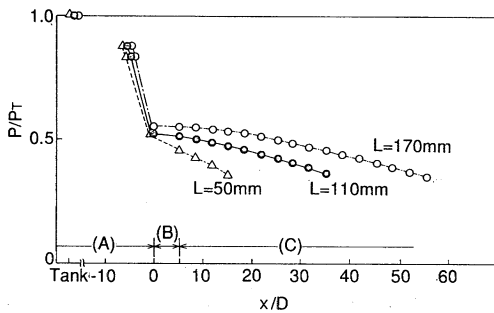


図 7 (b) 加速管長の異なるノズルにおける  $x$  軸方向の静圧分布  
Tank : ノズルタンク  
[ $P_T = 3 \text{ kgf/cm}^2$ ]

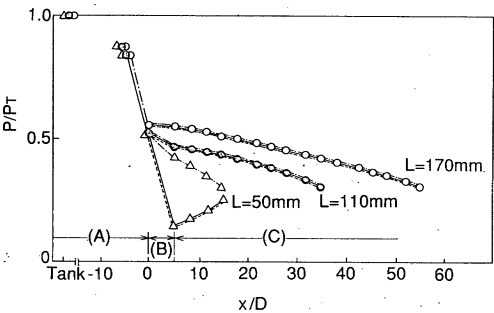
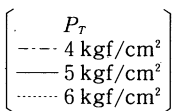


図 7 (c) 加速管長の異なるノズルにおける  $x$  軸方向の静圧分布  
Tank : ノズルタンク



壁面静圧  $P$  はノズル入口から順次減少して出口で大気圧になる比較的良好な管内流れを示す。

ノズル出口直前における壁面静圧比  $P/P_T$  は、ノ

ズルタンク圧力  $P_T$  が低いとき ( $P_T = 2 \text{ kgf/cm}^2$ ) は、加速管長の長いほど若干高くなるが、タンク圧力  $P_T$  が高くなる ( $P_T = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$ ) と加速管長による差はなくなる。従って、ノズルタンク圧力  $P_T \geq 3 \text{ kgf/cm}^2$  では、ノズル出口流速はタンク圧力  $P_T$  が同一なら、加速管長にかかわらず等しい。

ニードルの下流の加速管入口断面 ( $X/D = 5$ ) の静圧は、ノズルタンク圧力  $P_T$  が同一なら加速管長の長いノズルほど高い。これは、加速管出口直前の静圧は大気圧に等しく、加速管の長いノズルほど摩擦による大きなヘッド差を必要とするためである。従って、図 8 (a), (b) より加速管長の長いノズルほど、加速管入口断面 ( $X/D = 5$ ) でのマッハ数は小さ

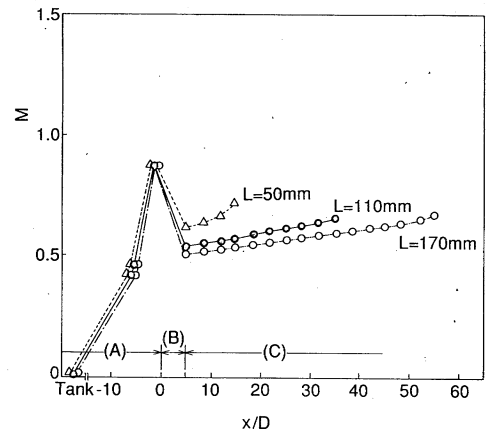


図 8 (a) 加速管長の異なるノズルにおける  $x$  軸方向のマッハ数分布  
Tank : ノズルタンク  
[ $P_T = 2 \text{ kgf/cm}^2$ ]

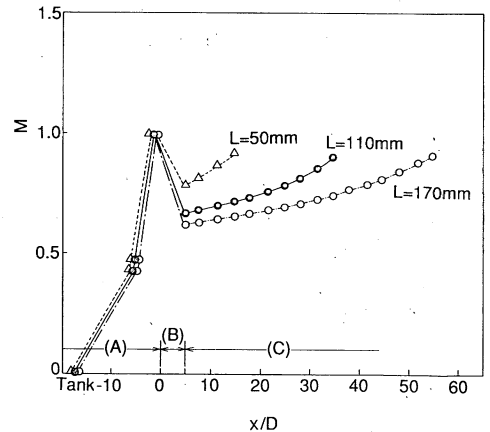


図 8 (b) 加速管長の異なるノズルにおける  $x$  軸方向のマッハ数分布  
Tank : ノズルタンク  
[ $P_T = 3 \text{ kgf/cm}^2$ ]



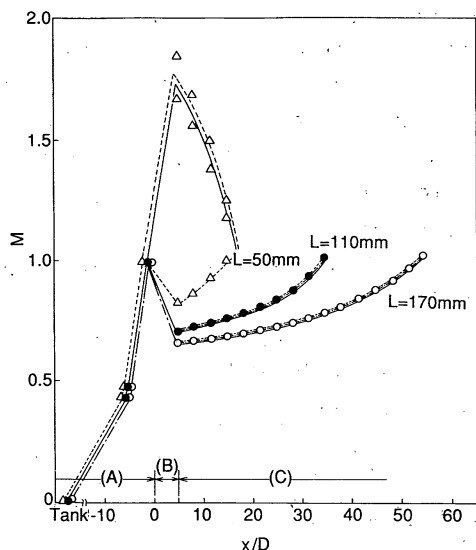


図8(c) 加速管長の異なるノズルにおける $x$ 軸方向のマッハ数分布  
Tank: ノズルタンク

$$\left[ \begin{array}{l} P_t \\ \text{---} 4 \text{ kgf/cm}^2 \\ \text{—} 5 \text{ kgf/cm}^2 \\ \cdots 6 \text{ kgf/cm}^2 \end{array} \right]$$

い.

そこで、ニードル先端部のスロート部 ( $X/D=0$ ) の圧力  $P_0$  が臨界状態 ( $M_0=1$ ) になるかどうかは、加速管入口の圧力  $P_1$  に依存し、特に、加速管の長いノズルほど  $P_1$  の値は高い。そのため、ニードル先端部が臨界状態になるのに必要なノズルタンク圧力  $P_t$  は加速管長の長いノズルほど高くなる。本実験に用いたノズルのニードル先端部が臨界状態 ( $M=1$ ) になるのに必要なノズルタンク圧力は、加速管長  $L=170$  mm の場合には、 $P_t=3.5$  kgf/cm<sup>2</sup> 以上、 $L=110$  mm の場合には、 $P_t=3.0$  kgf/cm<sup>2</sup> 以上、 $L=50$  mm の場合には、 $P_t=2.5$  kgf/cm<sup>2</sup> 以上となる。

ノズルニードル先端部の質量流量  $m$  を調べると、前述の(2)式で示すように、スロート部が臨界状態になるまでは、同一空気タンク圧力  $P_t$  ならば、加速管長の長いノズルほどスロート部圧力  $P_0$  が大きくなるため、質量流量  $m$  は少ない。

例えば、ノズルタンク圧力  $P_t=2$  kgf/cm<sup>2</sup> (202.3 kPa) のとき、加速管長  $L=170, 110, 50$  mm の質量流量を比較すると、それぞれ  $1.966 \times 10^{-3}$ ,  $1.996 \times 10^{-3}$ ,  $2.021 \times 10^{-3}$  kg/s となる。

#### 4.2.2 ニードル先端のスロート部と加速管長口がともにチョークする場合

図7(c), 8(c)から加速管長の長い  $L=170$  mm のノズルでは、基準ノズルと同様に  $P_t=4$  kgf/cm<sup>2</sup> でノズル出口が臨界状態になり、それ以上空気タンク圧力  $P_t$  を高くしても、管内流れに変化がない。ところが、加速管長の短い、 $L=50$  mm のノズルでは、ニードルから出た加速管入口の静圧は、 $P_t \geq 5.0$  kgf/cm<sup>2</sup> になると急激に低くなり、流れが  $M=1$  を越える。これより、加速管長の短いノズルでは、タンク圧力がある値以上になるとニードルスロート部からの加速管入口部への流れは膨張流れとなり、ラバールノズルにおける流れに近い流れになっていると考えられる。そして、 $M>1$  の流れは、加速管内を下流に進むに従い、壁面摩擦のため逐次減速して、ノズル出口で  $M=1$  近くまで減速して大気中に放出されている。

#### 4.3 ノズル内衝撃波の発生

加速管内での超音速流れの様相を詳しく調べるため図9(a), 9(b)に、加速管長  $L=70$  mm のノズルにおける壁面静圧  $P/P_t$  分布とマッハ数分布を示す。ノズルタンク圧力  $P_t \geq 5.0$  kgf/cm<sup>2</sup> では前述した他の加速管長さのノズルと異なった管内流れを示す。すなわち、図9(a)より壁面静圧  $P_0/P_t$  は、ニードル出口 ( $X/D=0$ ) から加速管入口 ( $X/D=5$ ) に入ると  $L=50$  mm のノズルと同じように急激に低下し、その後、管内で下流に行くにしたがい静圧は急激に回復する。そして、 $P_t=4$  kgf/cm<sup>2</sup> の静圧分布曲線に一致するようになる。その下流ではノズルタンク圧力  $P_t$  を変化させても変化しない。

図9(b)のマッハ数の分布をみると、加速管入口での  $M>1$  の超音速流れが加速管途中で亜音速に減速されている。このことから  $L=70$  mm の加速管ノズルでは、ノズルタンク圧力  $P_t \geq 5$  kgf/cm<sup>2</sup> では加速管で衝撃波が発生して流れが急減速していると考えられる。

以上のことから、本実験に用いたノズルの加速管内の流れは次の特徴を持つ。

すなわち、ノズルタンク圧力  $P_t \geq 5.0$  kgf/cm<sup>2</sup> では、ニードルから出た直後の加速管の入口の流れは超音速となる。この流れは、前述の図8(c)に示す加速管長が  $L=50$  mm のノズルにおいては、ちょうど加速管出口で  $M=1$  のチョークした状態になるが、それより加速管が長い図9に示す  $L=70$  mm

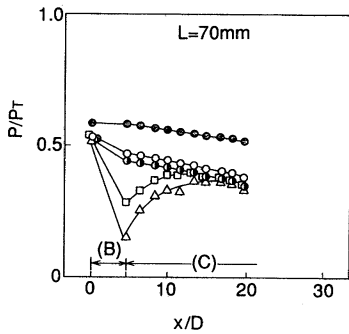


図9(a) 加速管長  $L = 70$  mm ノズルにおける  $x$  軸方向管内の静圧分布

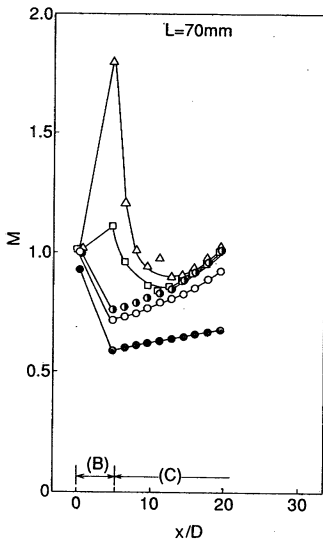
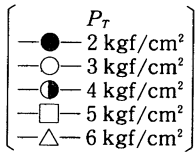
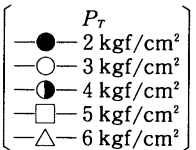


図9(b) 加速管長  $L = 70$  mm ノズルにおける  $x$  軸方向管内局マッハ数の分布



のノズルでは、管の途中で流れが  $M=1$  のチョーク状態になれず、必ず管出口で  $M=1$  のチョークする流れとなる。結局、この流れはファノール流れだけでは実現できないため、管内に衝撃波の発生を伴うことになる<sup>9)</sup>。

この衝撃波は、加速管長がさらに長くなると加速

管上流側に形成されていく。本実験のノズルでは、加速管長が  $L = 110$  mm 以上になると、図8(c)に示すようにノズルタンク圧力  $P_t$  を  $5 \text{ kgf/cm}^2$  以上にしても、加速管入口を含めた管全体の流れが亜音速になっているが、これは、衝撃波がニードルスロート部に達し消滅したからであると考えられる。

ここで、加速管長  $L = 70$  mm のノズルにおいて垂直衝撃波が管内で発生したとしてその前後の状態量の変化を求める。

衝撃波上流のマッハ数を  $M_a$ 、圧力を  $P_a$ 、下流のマッハ数を  $M_b$ 、圧力を  $P_b$  とすると、前後の状態量は下記式で示される。

$$M_b^2 = \frac{(K-1)M_a^2 + 2}{2KM_a^2 - (K-1)} \quad (4)$$

$$\frac{P_b}{P_a} = \frac{2KM_a^2 - (K-1)}{K+1} \quad (5)$$

$$(K=1.4)$$

$P_t = 6 \text{ kgf/cm}^2$  の場合の上流の値、 $M_a = 1.826$ 、 $P_a = 89.3 \text{ kPa}$  を入れて(4)(5)式より、 $M_b$ 、 $P_b$  を求めると  $M_b = 0.610$ 、 $P_b = 332.4 \text{ kPa}$  となる。そこで、これらの値を用い、図10に、管内衝撃波前後の圧力  $P$  の変化について、計算値と壁面静圧からの実測値との比較を示す。これより、計算値と実測値とは異なるが、一般に、実際の管内流れでは、衝撃波は境界層と干渉を起こし、急激な圧力上昇で境界層が厚くなって環状の斜め衝撃波が発生したり、反射波も現れ互いに干渉し、いくつかの斜め衝撃波を経た後、その下流では亜音速流れになるが、この場合にも1つの強い衝撃波ではなく、いくつかの衝撃波の後、亜音速流れに変わっているものと考えられる。

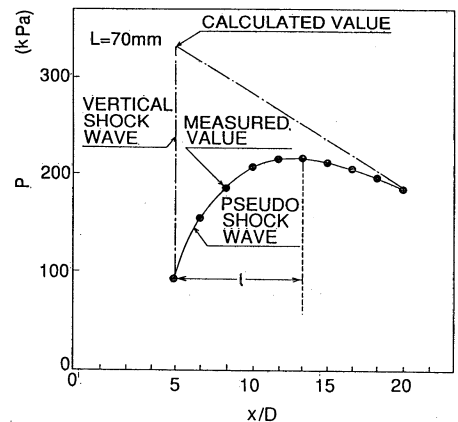


図10 加速管長  $L = 70$  mm ノズルにおける管内衝撃波前後の圧力変化の計算値と測定値の比較

## 5. 結論

本研究では、変形箄補助ノズル方式 AJL の繰入れ性能の向上を目的とした基礎的研究として、メインノズル管内の壁面静圧を測定して、ノズルタンク圧や加速管長を変えてノズル管内流速の変化を解析した。得られた結果は次の通りである。

(1) メインノズル管内流れでは、 $M=1$  となって臨界状態を示すスロート部が、ニードル先端部と加速管出口部の2か所で生ずる可能性があり、タンク圧力を変えることにより、これらのスロート部が発生し、ノズル管内流れの様相が特徴づけられる。

(2) ニードル先端部が臨界状態になるタンク圧力  $P_T$  は加速管長に依存し、加速管長が長くなるほど  $P_T$  は高い。

(3) 加速管出口が臨界状態になるタンク圧力  $P_T$  は、加速管長にかかわらずほぼ一定で、本実験で用いたノズルでは、 $P_T \approx 4 \text{ kgf/cm}^2$  である。

(4) 加速管出口が臨界状態になる流れでは、管内流れは常に亜音速の場合と超音速流れを含む場合に分けられ、加速管長の短いノズルにおいて後者の例が認められる。

(5) 本実験の加速管長  $L = 70 \text{ mm}$  のノズルにおいて加速管内で衝撃波が発生する。

(6) 以上の結果より、メインノズルの噴射空気の効果率を向上させるには、ニードル先端部だけで、ノズル加速管の内径や長さ等の各部仕様の調和をはかることが重要といえる。

## 付録

### メインノズル管内の流速算出

#### 1. ノズル内領域 A の流れ

図3において、断面  $T$  は実際のメインノズルでの上流の空気タンクに、断面 0 がニードル先端部の最小断面積部に、断面 1 が加速管入口部に対応する。

先細ノズルの流れでは、断面  $T$  の圧力  $P_T$  と断面 0 の圧力  $P_0$  との比率により断面 0 の流れが異なる。そこで、各条件による断面 0 の流れの諸量を求める。

1-1 加速管入口の圧力  $P_1$  がスロート部圧力  $P_0$  の臨界値 ( $0.5283P_T$ ) 以上の場合

断面 0 の流れは亜音速となり、 $P_0 = P_1$  とおける。従って、

$$\text{エネルギーの式} \quad h_0 + \frac{V_0^2}{2} = h_T$$

とエントロピーの関係式より、誘導すると、

$$V_0 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_T \left\{ 1 - \left( \frac{P_0}{P_T} \right)^{(k-1)/k} \right\}} \quad (\text{A-1})$$

となり、断面 0 の流速  $V_0$  はよどみ点の圧力  $P_T$ 、温度  $T_T$ 、並びに加速管入口の圧力  $P_1 (= P_0)$  より求まる。次に、

$$\frac{P_T}{P_0} = \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right)^{k/(k-1)}$$

より、断面 0 のマッハ数  $M_0$  を求めて、下記 (A-1) (A-3) (A-4) 式へ代入し、断面 0 の  $T_0$ 、 $\rho_0$ 、 $a_0$  を求める。

$$T_0 = T_T / \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right) \quad (\text{A-2})$$

$$\rho_0 P_T / \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right)^{1/(k-1)} \quad (\text{A-3})$$

$$a_0 = \sqrt{kRT_0} \quad (\text{A-4})$$

1-2 加速入口の圧力  $P_1$  がスロート部圧力  $P_0$  の臨界圧 ( $0.5283P_T$ ) 以下の場合

断面 0 の流れは  $M=1$  の臨界状態となる。従って、そのときの断面 0 の流れの諸量は  $M_0=1$  において、よどみ点の諸量  $T_T$ 、 $\rho_T$  とともに上式 (A-2) (A-3) (A-4) へ代入し、 $T_0$ 、 $P_0$ 、 $a_0$  が求まる。

#### 2. ノズル内領域 B の流れ

断面 1 の流れの諸量を求めるに当たり、断面 0 の諸量は前項で求めたものを用いる。断面 0 と 1 の間の検査体積で、

連続の式

$$\rho_0 V_0 A_0 = \rho_1 V_1 A_1$$

運動量の式

$$P_0 A_0 + \rho_0 V_0^2 A_0 = P_1 A_1 + \rho_1 V_1 A_1$$

エネルギーの式

$$\frac{a_0^2}{k-1} + \frac{V_0^2}{2} = \frac{a_1^2}{k-1} + \frac{V_1^2}{2}$$

が成立し、次式が誘導される。

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{A_0 M_0}{A_1 M_1} \sqrt{\frac{2 + (k-1) M_0^2}{2 + (k-1) M_1^2}} \quad (\text{A-5})$$

上式 (A-5) に、断面 0、1 の断面積  $A_0$ 、 $A_1$ 、前項で得られた断面 0 の流れの諸量  $M_0$ 、 $P_0$  を、また断面 1 の  $P_1$  は断面 1 の壁面静圧値を代入して断面 1 のマッハ数が求まる。

次にそのマッハ数  $M_1$  を (A-2) (A-3) (A-4) 式へ代入して断面 1 における流れの諸量  $T_1$ 、 $\rho_1$ 、 $a_1$  を求める。

#### 3. ノズル内領域 C の流れ

図3の模式図において、断面 1 が実際のメインノ

ズルでの加速管入口に、また断面  $e$  が加速管出口に対応する。

断面 0 から距離  $x$  離れた位置に微小幅  $dx$  の検査体を考える。添え字を省略して表すと、

(a) 連続の式  $m/A = \rho V = \text{一定}$  より、

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (\text{A-6})$$

(b) 運動量の式

$$\begin{aligned} \rho VA[(V+dV)-V] \\ = PA - (P+dP)A - \tau_w A_s \end{aligned} \quad (\text{A-7})$$

(c) エネルギーの式

$$dh + VdV = 0 \quad (\text{A-8})$$

管の摩擦係数  $f = \tau_w / \frac{1}{2} \rho V^2$  と定義するとマッハ数の軸方向の変化は、

$$4f \frac{dx}{D} = \frac{2}{kM^3} \left[ \frac{2(1-M^2)}{2+(k-1)M^2} dM \right] \quad (\text{A-9})$$

である。

ファノー流れでは、管入口の流速が亜音速でも音速でも、管出口に向かうほどマッハ数は 1 に近づくから、図に示すように任意の断面  $x$  から  $M=1$  の臨界状態の断面  $x^*$  まで (A-9) 式を積分すると、

$$\frac{4f}{D} \int_x^{x^*} dx = \int_M^1 \frac{2}{kM^3} \left[ \frac{2(1-M^2)}{2+(k-1)M^2} dM \right]$$

$x^* - x = L_{\max}$  と置くと、

$$\begin{aligned} \frac{4f}{D} (x^* - x) &= 4f \frac{L_{\max}}{D} \\ &= \frac{1-M^2}{kM^2} + \frac{k+1}{2k} \ln \left[ \frac{(k+1)M^2}{2+(k-1)M^2} \right] \end{aligned} \quad (\text{A-10})$$

である。

また、

$$\frac{T}{T^*} = \frac{k+1}{2+(k-1)M^2} \quad (\text{A-11})$$

$$\frac{P}{P^*} = \frac{1}{M} \left[ \frac{k+1}{2+(k-1)M^2} \right]^{1/2} \quad (\text{A-12})$$

である。

任意の断面  $x$  きおけるマッハ数は、以下のようにして求める。

前項の計算より得られた断面 2 の流れの諸量のうち、 $M_2$ ,  $T_2$  を (A-11) 式に、また  $M_2$ ,  $P_2$  を (A-12) 式へ代入して  $M=1$  なる臨界状態の断面  $x^*$  における  $T^*$ ,  $P^*$  を求める。

次に、 $P^*$  を (A-12) 式に代入して断面  $x$  における  $P_x$  (加速管の壁面静圧の実測値) を代入してその断面におけるマッハ数  $M_x$  を求める。

#### 参考文献

- 1) 宇野, 石田ら; 繊維誌, **13**, 9 (1960)
- 2) Duxbury; J. Text. **50**, No. 10, P 558 (1959)
- 3) Ström; Transaction of Chalmers University of Technology, (1962)
- 4) Lyubovitskii; Tech. of Text. Ind. USSR, 1966-6
- 5) 村松; 繊維学会, 第42回年次大会要旨集, P 125 (1989)
- 6) 笠島, 橋本ら; シャトルレスルームの汎用技術に関する研究 (中小企業庁編), P 47 (1981)
- 7) 石田, 岡島ら; 繊維誌, **42**, T 69 (1989)
- 8) 岩本; 圧縮性流体力学 (共立出版), P 74 (1980)
- 9) 生井, 松尾; 圧縮性流体の力学 (理工学社), P 58 (1983)