

機関番号：27101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560167

研究課題名（和文） 極小ノズルを通る圧縮流れのチョーク現象の解明と微小流量用臨界流量計への応用

研究課題名（英文） Study of Choking Phenomena of Compressible Flow in Extremely Small Nozzles and its Application to Extremely small and Critical Mass Flow Meters

研究代表者

松尾 一泰（KAZUYASU MATSUO）

公立大学法人北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号：30037759

研究成果の概要（和文）：

最近、極めて微小なサイズの音速ノズルや超音速ノズルがさまざまな工業分野において注目されているが、そのような極小ノズルを通る圧縮流れの微小流量に適用可能な質量流量計は開発されていない。本研究では、極小ノズルにおける圧縮流れのチョーク現象を調べ、流れがチョークするメカニズムを解明するとともに、ノズル壁面に発達する境界層を考慮に入れて、微小流量用臨界流量計の形状とチョーク圧力比や流出係数の関係を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The choking phenomena of extremely small sonic or supersonic nozzles have been investigated using four nozzles with the same diameter but different boundary layer thickness at the exit of the nozzle. The effects of the boundary layer thickness at the nozzle exit to the critical pressure ratio across the nozzle when the flow is just choked have been clarified and the discharge coefficients of different shape of nozzles at the critical conditions have been obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：圧縮性流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：チョーク現象，圧縮流れ，臨界流量計，極小ノズル，境界層，超音速流れ

1. 研究開始当初の背景

最近、極めて微小なサイズの音速ノズルや超音速ノズルが分子クラスターを生成する超音速分子流法，レーザー切断のアシストガス

加速法など、さまざまな工業分野において注目されている。このような極小ノズルを利用する技術をさらに進展させるためには、ノズルを通るガスの質量流量を正確に測定し制御

可能とすることが必要である。

ガスの質量流量の測定には、先細ノズルあるいは先細末広ノズルのスロートにおける流れのチョークを利用した臨界流量計が最適である。これは臨界ノズルともよばれ、標準流量計などとして広く使用されている。

しかるに、現在使用されている臨界ノズルは比較的大流量に適した流量計であり、このような微小流量に適用可能な臨界流量計は開発されておらず、このような極小ノズルにおける流れのチョーク現象やチョーク条件については現在全く分かっていない。このため、極小ノズルを通る流れのチョーク現象の早急な解明が望まれている。

2. 研究の目的

本研究は極小ノズルにおける圧縮流れのチョーク現象を実験的に究明するとともに、チョーク条件やチョーク流量に及ぼすマッハ数、レイノルズ数、流れの非一様性、圧力および温度条件などの影響を明らかにすることを目的とする。また、これらの研究成果を応用して、微小流量用臨界流量計のノズル形状が、ノズルのチョーク圧力比やチョーク後のノズル流出係数に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、研究目的を達成するに、研究代表者松尾一泰と研究分担者宮里義昭の2名で研究組織を構成し、代表者は主として理論的研究を担当し、分担者は主として実験的研究を担当する。

理論的研究では、ノズルのチョーク現象や臨界流量計に関する国内外の研究動向を引き続き調査するとともに、ノズル内の境界層の発達に基づく非一様な速度・密度・温度分布や作動気体の実在気体効果を考慮に入れて、ノズルスロートにおいて流れがチョークする条件を理論的に研究する。また、分担者宮里義昭が行う実験的研究の結果について、分担者と常時連絡をとりながら討論を重ね、理論的考察を行い、極小ノズルのチョーク現

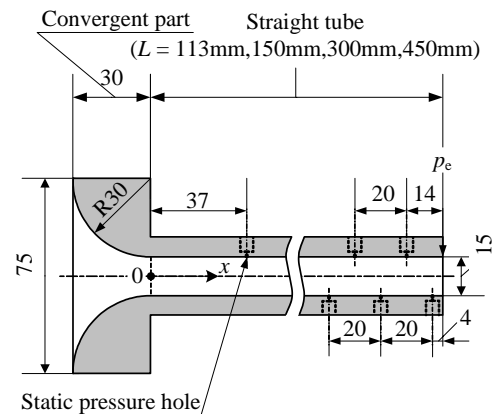
象の物理的メカニズムを解明する。

実験的研究では、大気から真空へ吸込む流れを利用した吸込み風洞を製作し、吸込み風洞実験を行い、供試ノズルのサイズも変化させて、広範囲のレイノルズ数に対するデータを蓄積して解析する。上記の理論的研究と実験的研究のいずれにおいても、ノズル形状は単純な軸対称ノズルとする。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果はつぎのとおりである。

(1) 下図に示すように、出口直径が同じで、入口から出口までの軸方向長さが異なる4個の先細ノズルを用いて、ノズル出口における境界層厚さを変化させることにより、ノズル出口の速度分布の非一様性が流れのチョークに及ぼす影響を実験的に調べた。実験はノズル上流のよどみ圧 p_0 を一定(大気圧)とし、ノズルの背圧 p_b を変化させて行った。得られた結果を要約すると、つぎのとおりである。



流れがチョークするときの圧力比、すなわちチョーク圧力比 $(p_b/p_0)_{ch}$ は、一次元定常等エントロピー流れの理論値より小さく、ノズル出口の境界層厚さが厚いほど小さい。すなわち、チョーク圧力比は境界層によって顕著に影響を受ける。

圧力比 p_b/p_0 がチョーク圧力比に等しい状態では、ノズル出口の主流マッハ数は1よりわずかに大きく、ノズル出口の主流の速度は超音速である。臨界状態におけるノズル出口マッハ数はノズル出口における境界層厚さが厚いほど大きい。

圧力比 ρ_b/ρ_0 をチョーク圧力比より小さくするとき、ノズル入口付近の流れは一定に保たれるが、ノズル出口およびそのすぐ上流の壁面静圧は ρ_b/ρ_0 の減少とともにわずかながら小さくなる。このため、流れがチョークしたか否かはノズル入口近傍の壁面静圧の測定値により判定できるが、ノズル出口の壁面静圧の測定値から判断するのは困難である。

流れがチョークするときの質量流量、すなわちチョーク流量は、一次元定常等エントロピー流れの理論値より小さく、ノズル出口の境界層厚さが厚いほど小さい。

(2) 先細ノズル出口における速度分布の非一様性が流れのチョーク圧力比やチョーク流量に及ぼす影響に関する上述の実験結果を、ファノー流れの理論値およびノズル出口で境界層を考慮した複合流れモデルと平均流れモデルによる計算値と比較し、以下の結論が得られた。

一次元定常等エントロピー流れの理論では、背圧 ρ_b とノズル上流のよどみ圧力 ρ_0 の比 ρ_b/ρ_0 の変化に対して、ノズル内の静圧 ρ_w と ρ_0 の比 ρ_w/ρ_0 は、ノズルがチョークした瞬間の圧力比 $(\rho_b/\rho_0)_{ch}$ の前後でなめらかに接続しない。一方、ファノー流れの理論では、 ρ_w/ρ_0 は、 ρ_b/ρ_0 の減少に伴いチョーク圧力比の直後でなめらかに一定値に近づく。 ρ_w/ρ_0 に対するファノー流れの計算値は、実験値と良く一致する。

ファノー流れによるチョーク圧力比 $(\rho_b/\rho_0)_{ch}$ の計算値は、本実験値に対して最大約 6% の誤差範囲内で一致する。

下表はノズル出口における境界層厚さと出口半径の比 δ_e/R を変化させたときの複合流れモデルと平均流れモデルによるチョーク圧力比 $(\rho_b/\rho_0)_{ch}$ の計算値と実験値を比較した表である。複合流れモデルと平均流れモデルによるチョーク圧力比 $(\rho_b/\rho_0)_{ch}$ の計算値は、ノズル出口の境界層厚さの増加とともに一次元等エントロピー流れの理論値より単調に減少する。また、 ρ_b/ρ_0 が $(\rho_b/\rho_0)_{ch}$ のときのノズル出口の主流マッハ数 $(M_e)_{ch}$ に対する両モデルによる計算値はノズル出口の境界層厚さの増加とともに一次元等エントロピー流れの理論値より単調に増加する。

$(\rho_b/\rho_0)_{ch}$ と $(M_e)_{ch}$ に対する本実験値は、複合流れモデルより平均流れモデルによる計算値と良く一致する。

e/R	$(\rho_b/\rho_0)_{ch}$		
	Experiment	Compound flow model	Average flow model
0.093	0.517	0.509	0.516
0.187	0.493	0.491	0.503
0.440	0.469	0.449	0.470
0.640	0.435	0.421	0.445

ρ_b/ρ_0 がチョーク圧力比 $(\rho_b/\rho_0)_{ch}$ のときの流出係数 C_d に対する平均流れモデルによる計算値は、複合流れモデルによる計算値よりわずかに大きい。また、両モデルによる C_d の計算値は、ノズル出口の境界層厚さの増加とともに一次元等エントロピー流れの理論値より単調に減少する。複合流れモデルおよび平均流れモデルの計算値は、いずれも本実験値と同じ傾向を示し、実験値と良く一致する。

以上の結果より、流れがチョークする断面において速度分布が一様でないときのチョーク条件は、断面にわたり質量流量を考慮した平均流れのマッハ数が 1 となる条件と結論できる。また、先細ノズルの流れがチョークしているときには、主流が超音速でも背圧の影響は上流に伝わらない。

(3) 先細ノズル流れのチョークに及ぼす境界層の影響を調べるため、ノズル出口の境界層厚さが異なる 4 種類のノズルを用いて実験した。得られた結果を要約すると、つぎのとおりである。

ノズル内の壁面静圧はノズル出口に向かって単調に減少し、流れがチョークしたときの背圧とノズル上流全圧の比 ρ_b/ρ_0 は等エントロピー流れと仮定した理論値 0.528 よりも小さい。なお、 $\rho_b/\rho_0 = 0.528$ のとき、ノズル出口の主流マッハ数は $M_e = 1$ であるが、流れはチョークしていない。

流れがチョークしたとき、チョーク断面はノズル出口より上流に位置し、境界層排除厚さはチョーク断面からノズル出口に向かって減少する。このため、主流マッハ数 M はチョーク断面において $M = 1$ であるが、チョーク断面からノズル出口まで増加し、ノズル出口で超音速と

なる。

チョーク断面は境界層が厚くなるほどノズル出口より上流に移動する。チョーク断面とノズル出口における境界層排除厚さの実験値は複合流れモデルによる計算結果と定性的に一致する。

以上の結果に基づき、先細ノズルにおいて流れがチョークしたとき、ノズル出口における主流マッハ数が1よりも大きくなる現象について、定性的流れモデルを提唱した。このモデルでは、 p_b/p_0 を1から徐々に減少する場合、 $p_b/p_0 = 0.528$ となると、ノズル出口の主流マッハ数は1となるが、ノズル内の流れはまだチョークしていない。この状態から背圧をさらに減少させると、背圧の減少の影響が境界層を通過してノズル出口近傍の流れに及ぶ。その結果、出口近傍における壁面静圧は流れ方向に減少し、流れは加速され、チョーク断面がノズル出口より上流側に移動する。流れの加速により、チョーク断面からノズル出口までの境界層排除厚さは小さくなるため、ノズル出口における主流は超音速となる。

本研究で得られた成果の国内外における位置づけとインパクトはつぎのとおりである。すなわち、極小ノズルにおける流れのチョーク現象がさまざまな工業分野で問題となっており、現在、わが国では、独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部気体流量標準研究室において微小流量計測を目的とした微小臨界流量計の研究開発が進められている。本研究は、流体の圧縮性と粘性を考慮に入れて極小ノズルを通る流れのチョーク現象を流体力学的観点から解明し、チョーク圧力比やチョーク流量に影響を及ぼす因子やチョーク流れの三次元構造を解明させたものである。本研究成果は臨界流量計に関する現在の国際規格と国内規格を低レイノルズ数域へ拡張する際に有用な成果であり、微小流量用の臨界流量計の設計が可能となることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

久保和範, 宮里義昭, 松尾一泰, 先細ノズル流れのチョークに関する研究(第3報, チョーク流れの詳細構造), 日本機械学会論文集, 査読あり, B編, 76巻, 767号, 2010, pp.1048 - 1053.

久保和範, 宮里義昭, 安信 強, 松尾一泰, 先細ノズル流れのチョークに関する研究(第2報, 実験値と理論値との比較), 日本機械学会論文集, 査読あり, B編, 75巻, 754号, 2009, pp.1253 - 1258.

宮里義昭, 久保和範, 近藤陽介, 松尾一泰, 先細ノズル流れのチョークに関する研究(第1報, チョーク圧力比とチョーク流量に関する実験), 日本機械学会論文集, 査読あり, B編, 75巻, 752号, 2009, pp.724 - 729.

〔学会発表〕(計4件)

久保和範, 宮里義昭, 松尾一泰, 境界層を伴う管内流れのチョークに関する実験的研究, 日本機械学会九州支部第63期総会講演会, 2010.

久保和範, 宮里義昭, 松尾一泰, 先細ノズルにおけるチョーク流れの三次元構造に関する実験的研究, 日本機械学会中国四国支部第47期総会講演会, 2009.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 一泰 (MATSUO KAZUYASU)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授
研究者番号: 30037759

(2) 研究分担者

宮里 義昭 (MIYAZATO YOSHIKI)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授
研究者番号: 30253537