境界層の影響を考慮した矩形先細ノズルの チョーク現象に関する可視化実験 Visualization Experiments on Choking Phenomena of Rectangular Convergent Nozzle with Boundary Layer

○学 西岡 達矢 (北九大)

Tatsuya NISHIOKA, The University of Kitakyusyu, 1-1, Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyusyu, Fukuoka

正 久保 和範 (北九大)

Kazunori KUBO, The University of Kitakyusyu

正 宮里 義昭 (北九大)

正 松尾 一泰 (北九大)

Yoshiaki MIYAZATO, The University of Kitakyusyu

Kazuyasu MATSUO, The University of Kitakyusyu

Key Words: Convergent Nozzle, Critical Back Pressure, Choking

1. まえがき

先細ノズル内の一次元定常等エントロピー流れにおいて、上流のよどみ圧 p_0 を一定に保ち、背圧 p_b を徐々に下げると、圧力比 p_b/p_0 の減少に伴いノズル出口での流れの速度や質量流量が増加する。しかし、 p_b/p_0 をある値まで下げるとノズル出口での流れのマッハ数が 1 となり、これ以上 p_b/p_0 を減少させても、ノズル出口より上流の流れの状態が変化しなくなる。この現象をチョークといい⁽¹⁾、この時の圧力比をチョーク圧力比 $(p_b/p_0)_{ch}$ とする。

ノズルが比較的大きく、ノズルの入口から出口までの距離が短い場合には、出口の境界層厚さがノズル出口の断面積と比較して薄いため、チョーク圧力比は一次元等エントロピー流れと仮定した場合の理論値 0.528 とほぼ一致するが、ノズルが小さい場合には、チョーク圧力比は上記の値より小さくなる⁽²⁾。また、これまでの研究でチョーク圧力比と出口での境界層厚さの関係が明らかになった⁽³⁾。さらに、チョークした流れが先細ノズルを流れた場合、先細ノズル出口での流れはマッハ数 $M>1$ の超音速になっていることが過去の研究で示され、このことは先細ノズル内での境界層の影響によるものだと考えられている。

以上の背景から、本研究では、境界層が流れのチョーク圧力比やチョークの状態に与える影響を、壁面圧力測定と質量流量測定及び流れの可視化によって調べ、考察を行う。

2. 実験装置と実験方法

本研究で使用した大気吸込式風洞の全体図を図 1 に示す。風洞の上流に熱式質量流量計を設置し、ノズル前後でよどみ圧力の測定をした。熱式質量流量計を通った流れはノズル上流のよどみ室でよどみ状態となり、その後ノズルを通った後、真空ポンプによって外気に排出される。ノズルの上流でよどみ圧 p_0 を、下流で背圧 p_b をそれぞれ圧力セン

Fig.1 Schematic sketch of experimental apparatus

サで測定する。図 2 に示すように、実験に用いたノズルは、ノズル入口での曲率半径が 10[mm]で、その直後に高さ 5[mm]、幅 36[mm]、長さ 100[mm]の矩形直管を接続している。図 2 のように、直管出口を原点として流れ方向に x_c の座標を取り、 $x_c=-4$ [mm]から -92 [mm]まで上下交互に 8[mm]間隔で静圧孔を設置しており、直管部の上流から下流にかけての流れの壁面静圧 p_w を測定できるようにしている。

またこれに並行して、シュリーレン法によってノズル内の流れを可視化した。実験には光源としてキセノン光を使用し、2 枚の凹面鏡間に被写体である実験装置が来るように設置している。また、先細ノズルを通る流れを単発光によって観測し、その可視化範囲は図 2 に破線部で示している。ノズル内の流れの密度勾配の強弱による光の乱れを観測するためにカラーフィルタとナイフエッジを用いた。さらに、それぞれの場合で、図 2 に示すようなノズル断面に対して、垂直方向への流れの密度勾配を観測する縦切り、平行方向への密度勾配を観測する横切りの 2 方向での観測を行った。

Fig.2 Configuration of convergent nozzle

3. 実験結果と考察

3.1. 質量流量測定

背圧比 p_b/p_0 に対する無次元化した質量流量の変化を図 3 に示す。質量流量の無次元化において、 $\dot{m}$ は質量流量の実験値、 A は断面積、 p_0 はよどみ圧、 R は気体定数、 T_0 は室温である。流れがチョークしたと思われる無時限質量流量の値 0.643 から 99.9%漸近したときの背圧比を求めると $(p_b/p_0)_{ch}=0.485$ であり、一次元定常等エントロピー流れの理論値 0.528 より小さくなっている。これらの原因として、直管部での境界層の影響が考えられる。また、質量流量の

実験値の分布は一次元定常等エントロピー流れの理論値より全体的に小さく、質量流量の実験値と理論値の比である流出係数 $C_d=0.939$ である。

Fig.3 Relationship between p_w/p_0 and p_b/p_0

3.2. 壁面静圧測定

背圧とよどみ圧の比 p_b/p_0 (背圧比) に対する、壁面静圧 p_w とよどみ圧 p_0 の比 p_w/p_0 の変化を図4に示す。図4より、流れがチョークしたと思われる値から 100.1%漸近したときの背圧比を下向きの矢印で示す。この定義によってチョーク圧力比を求めると $(p_b/p_0)_{ch}=0.504$ である。ノズル内の流れを一次元定常等エントロピー流れと仮定した場合のチョーク圧力比の理論値は 0.528 なので、実験によって求めたチョーク圧力比はこれより小さいことがわかる。また、ノズル出口近傍ではチョークした後も壁面静圧が下がり続けていることがわかる。これらの原因として、ノズル内の境界層が影響していると考えられる。

また、質量流量から求めたチョーク圧力比と壁面静圧から求めたチョーク圧力比を比較すると、壁面静圧から求めたチョーク圧力比の方が 3.9%高いことがわかった。

Fig.4 Relationship between p_w/p_0 and p_b/p_0

3.3. シュリーレン写真

3 色カラーフィルタを用いた縦切りのシュリーレン写真を図5に示す。図5(a)より、背圧比 $p_b/p_0=0.464$ のとき、衝撃波が発生していることがわかる。また、 $p_b/p_0=0.564$ である流れを示した図5(b)を観察すると、管内の $x_e \approx -1$ [mm] の位置に垂直衝撃波が見られる。これより、管内で衝撃波が発生し、それより上流で流れが超音速となってノズルから噴出していることがわかる。

次に、3 色カラーフィルタを用いた横切りのシュリーレン写真を図6に示す。図6(a)より、ノズル出口の上流

$x_e=-1$ [mm] からノズル出口 $x_e=0$ [mm] の位置に向かって、境界層厚さが減少しているように見える。

(a) $p_b/p_0=0.464$

(b) $p_b/p_0=0.564$

Fig.5 Schlieren photograph with vertical color filter

(a) $p_b/p_0=0.464$

(b) $p_b/p_0=0.564$

Fig.6 Schlieren photograph with horizontal color filter

4. 結論

ノズル入口の曲率半径が 10 [mm] で、その直後に出口断面が高さ 5 [mm]、幅 36 [mm]、長さ 100 [mm] の矩形直管を接続したノズルを用いて、境界層が流れのチョーク圧力比やチョークの状態に与える影響を、圧力と質量流量の測定と可視化観察の実験から調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) 背圧比の減少に伴い、ノズル内流れの質量流量は増加し、 $p_b/p_0=0.485$ 近傍で無次元化した質量流量は 0.643 となり、以降ほぼ一定となる。したがって、質量流量は一次元定常等エントロピー流れの理論値 0.685 より低く、質量流量から求めたチョーク圧力比 $p_b/p_0=0.485$ も一次元定常等エントロピー流れの理論値 0.528 より低くなっている。また、流出係数 $C_d=0.939$ である。
- (2) 壁面静圧から求めたチョーク圧力比は $(p_b/p_0)_{ch}=0.504$ であり、質量流量から求めたチョーク圧力比より 3.9% 高い。
- (3) 可視化を行った結果、 $p_b/p_0=0.564$ のとき先細ノズル出口より上流で衝撃波が観察される。

参考文献

- (1) 松尾一泰, 圧縮性流体力学, (1944), 理工学社, pp.48-96.
- (2) Nakao, S. and Takamoto, M., Choking Phenomena of Sonic Nozzles at Low Reynolds Number, Flow Measurement and Instrumentation, 11-4, (2009), pp.285-291.
- (3) 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 B 編, 75 巻 752 号, (2009), pp.724-729.