90°曲がったノズルからの噴流*

須藤 浩三**, 高見 敏弘**, 檜 原 秀 樹***

Jet Issuing from 90° Curved Nozzle

Kozo SUDO, Toshihiro TAKAMI, and Hideki HIBARA

A jet issuing from a curved nozzle has been investigated experimentally under $Re=4 \times 10^4$. The curved nozzle has a 90° circular bend with a diameter 40 mm and a curvature radius 80 mm. Mean velocity is measured by using an inclined hot wire. The following conclusions are derived from experimental results: (1) The jet axis shifts gradually from the curved nozzle axis; (2) The maximum axial velocity of a curved nozzle jet decays more rapidly than that of a straight nozzle jet; (3) The velocity profile, which is skewed by a secondary flow near the curved nozzle, turns out to be similar to that of the axis-symmetric jet in the down stream.

Key Words: Fluid Mechanics, Jet, Curved Nozzle, Secondary Flow

1. 緒 言

曲がった管路から噴出する流れは、ロケットエンジンやボイラのバーナなどにみられる燃料供給装置、原子炉の緊急冷却装置、水車の入口ノズルにおける流れあるいは大気や海洋への排気・排水に見ることができる。流体が曲がった管内を流れる場合、流体は遠心力の作用を受けるため、管内には二次流れが発生する。そのため、曲がった管路から噴出した流体はその軌道が管軸方向からずれるなど、直管から噴出する流れには見られない特異な現象の起こることが考えられる。

噴流については、従来、多数の研究報告⁽¹⁾があるが、曲がったノズルから流出する噴流についての研究は現在のところ見当たらない。そこで、本研究では、熱線流速計を用いて曲がったノズルから流出する噴流の速度分布を測定し、流れ場の特徴の一部を明らかにした。以下にこれらの結果を報告する。

2. 主 な 記 号

b : 半値幅

d : ノズル径

(U, V, W) : ξ, η, ζ 方向の速度

W_m : 断面内の最大速度

W_0 : ノズル出口の最大速度 ≈ 17 m/s

(X, Y, Z) : 管軸を基準とした座標系 (図1)

(ξ, η, ζ) : 噴流軸を基準とした座標系 (図1)

図1 実験装置の概略

* 昭和61年10月6日 第64期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和61年3月27日。

** 正員、広島大学工学部 (〒724 広島市西条町下見)。

*** 学生員、広島大学工学部大学院。

3. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。装置は、送風機、整流

用流路、長さが2 mで内径40 mmの直管部、および内径 $d=40$ mmの円管を曲率半径 $R_c=80$ mmで水平方向に90°曲げてある管路(ノズル)より構成されてい

図2 噴流軸

図3 最大速度の減衰

図4 断面内の速度分布

る。なお、整流用流路の出口部に整流網を挿入してある。流速はトラバース装置に取付けた熱線流速計で測定した。このトラバース装置は、噴流軸方向、鉛直方向、および水平方向に移動することが可能である。

測定には回転プローブ法⁽²⁾を用い、ノズル内平均流速 (約 14 m/s) およびノズル径を用いたレイノルズ数 $Re = 4.0 \times 10^4$ のもとで、ノズル出口 $\xi/d \approx 0$ (出口より約 1 mm 下流の断面)、 $\xi/d = 2.1, 5.4, 11.0, 22.7$ の 5 断面において三軸方向の流速を測定した。

4. 実験結果

図 2 に、曲がりノズルより流出した噴流 (以後、曲がりノズル噴流と呼ぶ) の噴流軸 (噴流の最大速度の位置を連ねた線) を示す。曲がりノズル噴流の噴流軸は、ノズル内において誘起される二次流れのため、管軸とは一致せず、下流に進むにつれて両軸の間の差は大きくなっていく。図 3 は、最大速度の流れ方向への変化を示したものである。最大速度は、ノズル出口付近では曲がりノズル噴流のほうが直ノズル噴流 (直管より流出する噴流) よりもかなり早く減衰するが、下

流 ($\xi/d \geq 20$) ではほぼ同程度の割合で減衰する。なお、この直ノズル噴流の結果は、曲がりノズル噴流と同じレイノルズ数で、著者らが測定したものである。

図 4 (a)~(d) に各断面における速度分布を示す。これらは、噴流軸方向の平均速度 $\bar{W}$ の等速度線を表したもので、図 4 の左側はノズルの内壁側 (IN)、右側は外壁側 (OUT) に対応する。図 4 中の数値は、各断面内の最大速度 W_m で $\bar{W}$ を除した値である。なお、図 4 (a), (b) には、噴流軸に垂直な面内の速度ベクトル $\sqrt{U^2 + V^2}$ を示してある。 $\xi \approx 0$ [図 4 (a)] における軸方向速度の分布は、典型的な曲がり管内流れの分布、すなわち断面の外側で速度が速く、この高速領域が断面の上・下部で内側に伸び、内側の低速領域を包み込んだ分布をしている。一方、噴流軸に垂直な面内の速度ベクトル図より、断面の中央部では内側から外側へ、上・下部では外側から内側へ向かう流れがみられ、ノズル内において発生した二次流れが存続していることがわかる。しかし、内側では、外部へ向かう流れがみられる。 $\xi = 2.1d$ [図 4 (b)] における軸方向速度の分

図 5 軸方向速度分布

布は、全体に ξ 方向に少し引伸された形をしている。また、噴流の内部領域では、上流の $\xi=0$ における分布とよく似た分布がみられるが、外部領域では等速度線の間隔が広がり、周囲の空気との混合が生じている。二次流れの速度ベクトルは、中央部では内側から外側へ向かっているが、外部領域では外方へ向かう流れがみられる。しかし、この速度ベクトルの大きさは、 $\xi=0$ における速度ベクトルに比べると減衰して全体に小さくなっている。 $\xi=5.4d$ [図4(c)]では、出口付近の流れとは大きく異なり、高速領域の断面内側へのくい込みが消滅し、等速度線は滑らかな分布を示すようになる。しかし、噴流の形状は、 ξ 方向にかなり引伸された卵形となる。これより下流では [例えば図4(d)]、最大速度の位置がわずかに内側に寄る程度で、速度分布に大きな変化はみられない。

図5に、横軸に半値幅をとって表示した速度分布を示す。噴流は、噴流軸(ξ 軸)に関して対称ではないので、 ξ 軸と角 θ をなす面内の速度分布よりそれぞれ半値幅 b_θ を求め、これを用いて整理してある。図5中の実線は、軸対称噴流に関する実験式⁽³⁾

$$\frac{\bar{W}}{W_m} = \exp\left[-0.6749 \cdot \left(\frac{r}{b}\right)^2\right] \times \left\{1 + 0.0269 \cdot \left(\frac{r}{b}\right)^4\right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 r は噴流軸より測定した半径方向の距離、 b は半値幅を表す。 $\xi=5.4d$ 以後の下流では、噴流の外部領域を除き、実験結果は式(1)の表す曲線とよく一致する。

5. 結 論

(1) 曲がりノズル噴流の噴流軸は、ノズル軸とは一致せず、下流に進むにしたがいノズル軸から次第にずれていく。最大軸方向速度の減衰は、ノズル出口近傍では曲がりノズル噴流のほうが直ノズル噴流よりも早い。

(2) 軸方向速度の分布は、ノズル出口付近では曲がり管内流れの速度分布と同様な形を示すが、下流に進むにつれて自由噴流形の速度分布に近い分布形となる。

(3) ノズル出口付近の噴流軸に垂直な面内には、曲がり管内の二次流れに似た流れが存在するが、この流れは下流に進むにつれて急速に減衰する。

文 献

- (1) 例えば、Abramovich, G. N., *The Theory of the Turbulent Jets* (1963), M. I. T. Press.
- (2) 例えば、Jackson, T. W., D. G. Lilley, *Pap. A.I.A.A.*, 84-367 (1984).
- (3) Bradbury, L. J. S., *J. Fluid Mech.*, 23-1号 (1965), 31.

討 論

〔質問〕 丸 田 芳 幸〔樹形原総合研究所〕

液体機械メーカーの立場からは、興味ある研究である。以下二点教えていただきたい。

(1) もし、曲がりノズルの曲率半径を変化して実験してあるならば、噴流軸の偏りの量と曲率半径の実験式のようなものを示して欲しい。また、まだ未実験であれば、曲率半径の変化の実験を是非行っていただきたい。

(2) 曲がりノズルに入る前の管内の流速分布はどのようなになっているか。

〔回答〕 (1) 曲率半径を変化させた実験については行っていない。今後行う予定にしている。

(2) ノズル入口の速度分布は測定していないが、ノズルをはずした時の直管出口面での速度分布は、直管内乱流の分布になっている。この結果より、ノズルの影響があるとしても、ノズル入口ではほぼ発達した

管内乱流の速度分布に近い分布をしているものと考えている。

〔質問〕 牧 博 司〔東京理科大学〕

(1) 噴流軸の曲がり方はノズル出口付近では曲率をもっているが、十分遠方では曲率をもたないと考えられる。したがって、図2の実験値を結ぶ線は遠方では直線とすべきではないか。

(2) 図3の直管の実験値で、 ξ/d が5~6以下のものは W_m/W_0 の値は1ではないか。

〔回答〕 (1)

(2) ご指摘のように、噴流軸の軌跡は遠方では曲率をもたないと考えられる。なお、この点については今後実験により確かめたいと考える。

(2) 本実験での測定結果は図3に示すようになったが、ご指摘の点については今後更に実験を行い検証する。