

軸対称空気噴流の流動特性

宮城 一樹*¹ 円能寺 久行*²

Axisymmetric Air Jet Flow Characteristics

by

Kazuki MIYAGI*¹ and Hisayuki ENNOJI*²

(Received on Sep. 30, 2011 and accepted on Nov. 30, 2011)

Abstract

Conventional research has clarified the similarity of the velocity profile in the axisymmetric jet fully developing region. However, obtaining a similar profile with a method equal to fully developing region is not possible, since the velocity profile change is early intense due to the existence of the potential core region in the region. In this study, the velocity profile in the initial region of the axisymmetric air jet was measured by intelligent hot-wire (IHW) and the profile similarity was examined. Obtaining a method for similarity showing the velocity profile in the initial region of the jet was possible. The profile being approximately cut in the Gaussian curve was clarified by examining that a similar velocity profile is shown by the equation. The results demonstrated that the velocity profile was shown by the Gaussian curve.

Keywords: Flow characteristics, Axisymmetric jet, Air jet, Initial region, Similarity of velocity profile

1. 結論

軸対称噴流は直接噴射式エンジンやディーゼルエンジンをはじめ、溶接、溶断、ガラス・製紙・繊維・製鉄工業などにおける加熱、冷却、乾燥、除塵など工業の広い分野で数多く利用されている。従って、噴流の流動特性を明らかにすることは、それらの機器の性能向上や新たな設計、開発に役立つため重要である。

このような噴流の利用において、噴流は物体表面に衝突する場合が多い。従って、これらの基礎研究として噴流を物体に衝突させる、いわゆる衝突噴流が従来から数多く研究されている。たとえば、噴流が平面の物体に衝突する場合の研究として、ノズル直径、噴流初速度、衝突高さ、衝突角度などを変えた研究が行われている^{(1)~(6)}。また、直接噴射式エンジンの混合ガス噴射など噴流が曲面物体に衝突する場合も多い。そのため、本研究では曲面壁の代表的なモデルとして球状の内面に軸対称噴流が衝突する場合の研究を行っており、数値シミュレーションも同時に行うことを考えている。その場合、一般に壁面の影響を受けない高さの位置に流入面を設け、そこに自由噴流の無次元速度分布を仮定する方法が行われる。従って、自由噴流の速度分布を明らかにしておく必要がある。また、流入面の高さは種々変わるので、任意の高さの位置における自由噴流の速度分布に相似性があれば速度分布を一つの式で仮定することができるので便利である。自由噴流の完全発達領域における速度分布には相似性のあることが従来の研究で述べられている^{(7)~(8)}。しかし、そ

の分布曲線を表す近似式が示されているが、あまりよく一致していない。さらに、初期領域の速度分布については全く述べられておらず、完全発達領域と同様な方法で相似分布を得ることができるとは考えられない。そこで、本研究では供試ノズルで得られる噴流の完全発達領域における速度分布の相似性を確認した後、その近似式を検討するとともに、初期領域における速度分布の相似性および実験式による近似について検討する。

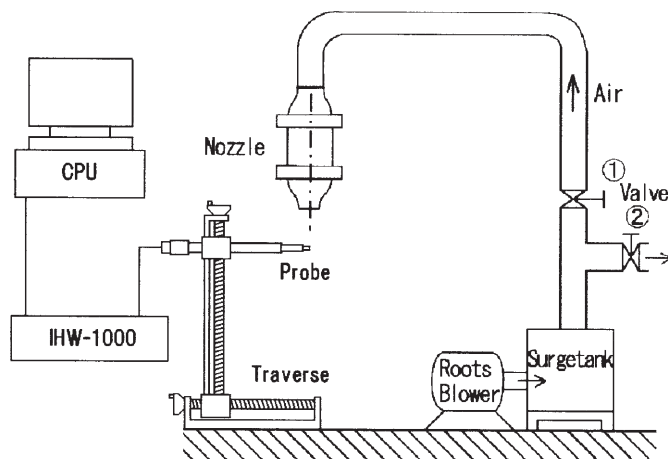


Fig.1 Experimental apparatus

*1 工学研究科機械工学専攻修士課程

*2 工学部動力機械工学科教授

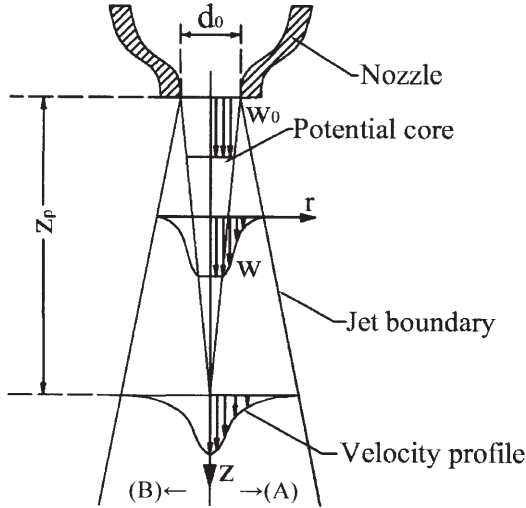


Fig.2 Flow model of axisymmetric jet

Table 1 Used symbol

r	(mm)	Radius from jet centerline
z	(mm)	Coordinate along jet centerline
z_p	(mm)	Length of potential core
d_0	(mm)	Nozzle diameter $d_0=14,20,30(\text{mm})$
w	(m/s)	Axial velocity
w_c	(m/s)	Centerline velocity
w_c'	(m/s)	Turbulence on centerline
w_0	(m/s)	Initial velocity of jet $w_0=45(\text{m/s})$
w_m	(m/s)	Maximum velocity
s	(mm)	Shift length
b'	(mm)	Half-value width after shift
r'	(mm)	Radius after shift $r'=r-s$

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

本実験で使用する実験装置を Fig.1 に示す。ルーツブローアから送られる空気は、サージタンク、流量調節弁および整流筒を通り縮流円形ノズルより噴出する。噴出した空気噴流の流速測定には熱線流速計(IHW)を使用する。

この熱線流速計はインテリジェントタイプであり、測定された流速や乱れの電圧データを自動的に平均化処理するため流速や乱れを精度よく測定することができる。今回、本実験で測定する流れは自由噴流であり、それは一次元流れと仮定できるので、熱線プローブにはI型プローブを使用する。熱線プローブはトラバース装置に取り付けられ、上下左右前後に三次元的に微動させることができるので、噴流の任意の点における流速を測定することが可能である。

2.2 噴流の概要

Fig.2 に本実験で測定しようとする自由噴流の概要を示す。直径 d_0 のノズルから z 方向に初速度 w_0 で噴出する軸対称(円形)空気噴流は、図中に示すように、ノズル出口から流速が減衰せず一定となるポテンシャルコアという円錐形の領域を形成する。ノズル出口からポテンシャルコアの先端までの領域が初期領域であり、その長さが

ポテンシャルコアの長さ (z_p) である。ポテンシャルコア内では速度 w の r 方向分布が一定となり、その後曲線的に変化するため速度分布は不連続となる。しかも、ポテンシャルコアが円錐形であるため一様な部分の長さは z とともに変化し、初期領域における速度分布は複雑となる。また初期領域を z 方向に過ぎた領域が完全発達領域であり、ここでは速度分布が連続となる。本実験ではこれらの全領域における速度分布を測定し、近似式で表すことを検討する。

2.3 実験条件および実験方法

実験に用いる使用記号を Table 1 に示す。ノズルは直径 $d_0=14, 20, 30(\text{mm})$ の3種類を使用する。これらのノズルは風洞用ノズルの設計法に基づいて製作されており、検定試験の結果によると、ノズル出口における速度分布はほぼ一様であり、乱れ強さは約 0.3%と小さく、ポテンシャルコア長はノズル直径の約5倍であり、標準的なノズルと言える。自由噴流の流速測定は噴出初速度 $w_0=45(\text{m/s})$ で行う。このとき、ノズル直径を代表長さとするレイノルズ数は $Re=w_0d_0/\nu=4.17\times 10^4\sim 8.94\times 10^4$ である。噴流中心軸上流速の測定はノズル出口から $z/d_0=15$ までの範囲で行う。また、噴流軸方向速度の r 方向分布は Fig.2 に示す(A)と(B)の両領域において $z/d_0=0.5\sim 14$ の断面上で測定する。

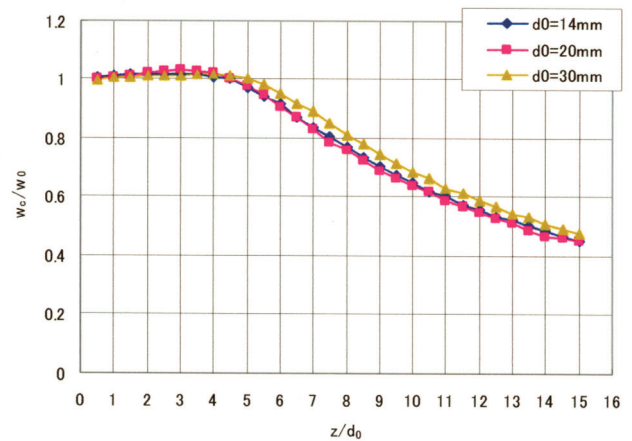


Fig.3 Centerline velocity profiles

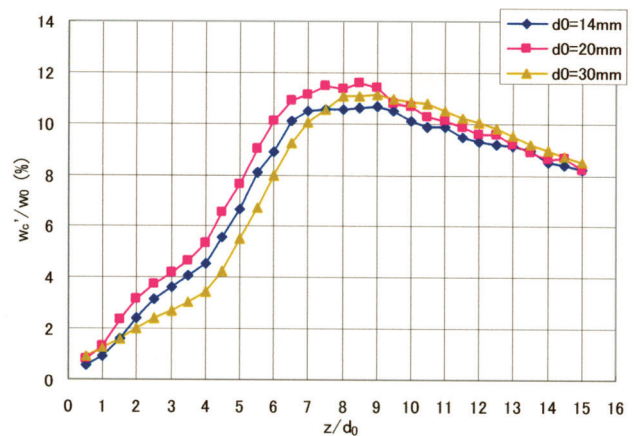
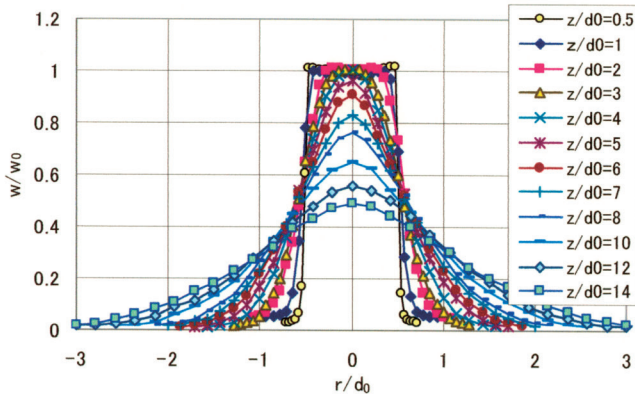
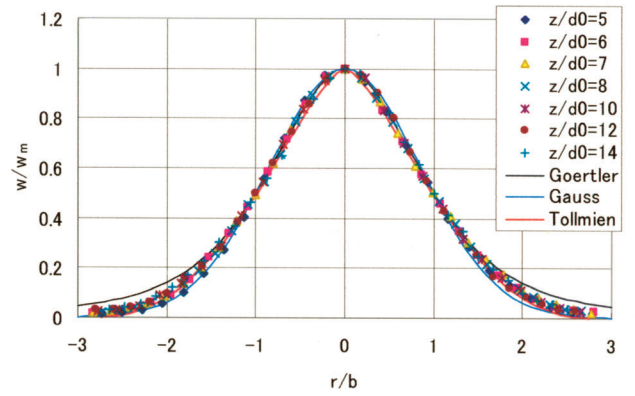


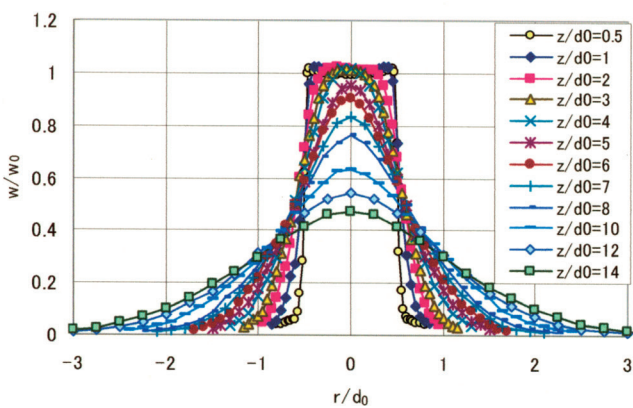
Fig.4 Centerline turbulence intensity profiles



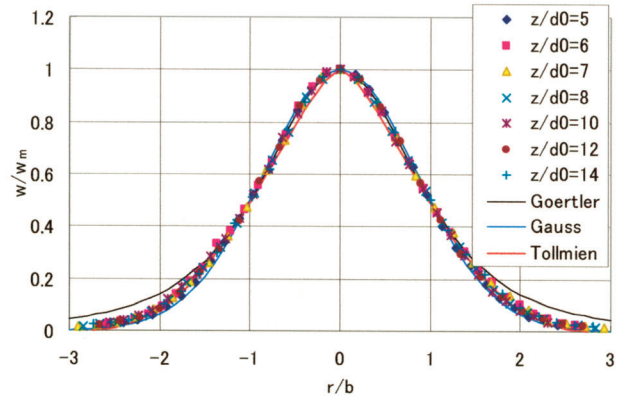
(a) $d_0=14\text{mm}$



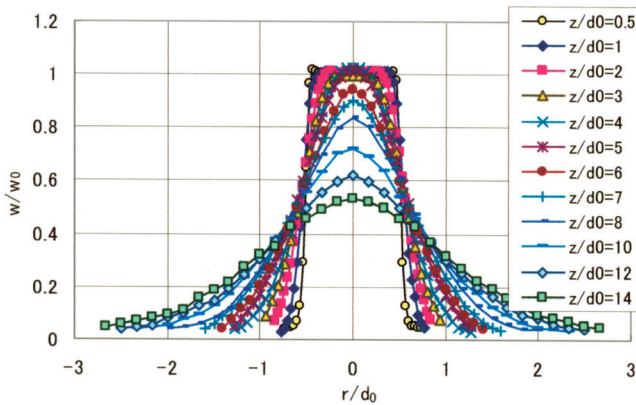
(a) $d_0=14\text{mm}$



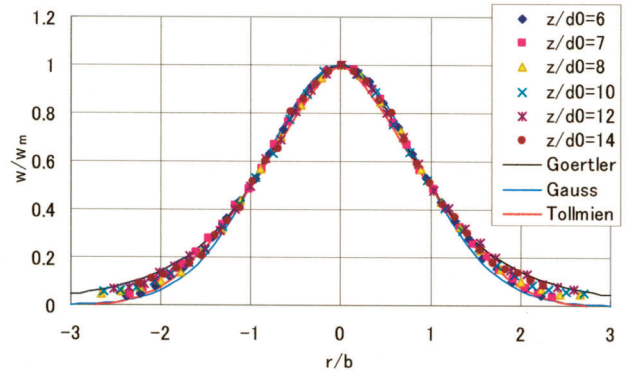
(b) $d_0=20\text{mm}$



(b) $d_0=20\text{mm}$



(c) $d_0=30\text{mm}$



(c) $d_0=30\text{mm}$

Fig.5 Axial velocity profiles

Fig.6 Similarity of velocity profiles in developed region

3. 実験結果および考察

3.1 噴流中心軸上流速分布および乱れ強さ分布

Fig.3 に自由噴流の中心軸上における流速の測定結果を無次元化して一般化したものを示す. この図から, 噴出初速度 $w_0=45(\text{m/s})$ を維持し, $w_c/w_0=1$ を保ったポテンシャルコアが存在していることがわかる. その領域の長さは $d_0=14\text{mm}$ および $d_0=20\text{mm}$ のノズルにおいて $z/d_0=4.5$, $d_0=30\text{mm}$ のノズルでは $z/d_0=5$ であることを確認できる. 従って, 初期領域は $d_0=14\text{mm}$ および $d_0=20\text{mm}$ のノズルの場合には $z/d_0=4.5$, $d_0=30\text{mm}$ のノズルの場合には $z/d_0=5$ と言える. また, 完全発達領域は z/d_0 の値が初期領域の値より大きい領域である.

Fig.4 には中心軸上乱れ強さの測定結果を無次元化して示す. 乱れ強さ (w'/w_0) は, ポテンシャルコア領域では比較的小さく, 緩やかに増大しているが, その領域を過ぎると急激に大きくなり, $z/d_0=7\sim 9$ の位置で最大となっている. これらの位置は速度分布において速度勾配の大きい, 流速が急変する領域であることが分かる.

3.2 全領域における軸方向流速分布

Fig. 5(a), Fig. 5(b), Fig. 5(c)に $d_0=14\text{mm}$, $d_0=20\text{mm}$, $d_0=30\text{mm}$ のノズルにおける噴流の水平断面上流速分布の測定結果を無次元化して一般化したものを同一のグ

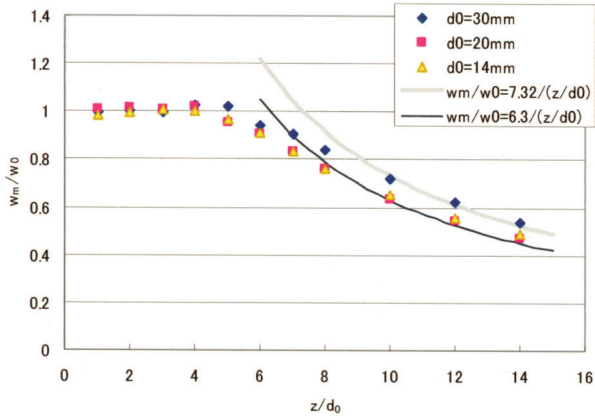


Fig.7 Maximum velocity

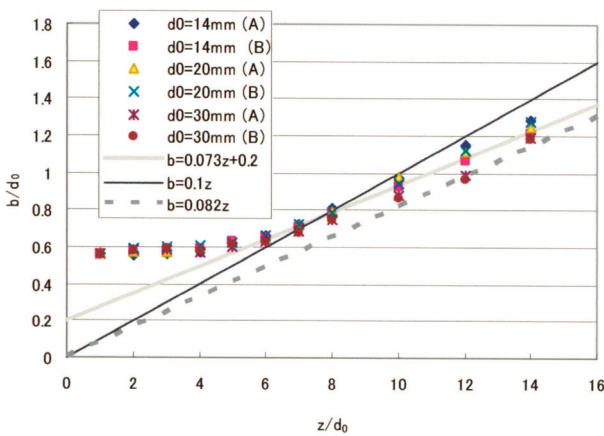
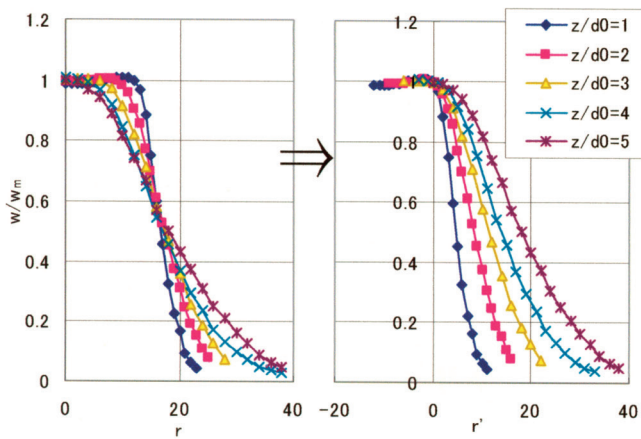


Fig.8 Half-value width



(a) Before shift (b) After shift
Fig.9 Axial velocity profiles before and after shift

ラフ上で比較している。いずれの図にも流速が噴出初速度と同じで一定値になっている領域がある。これはポテンシャルコア領域における流速分布であり、その形はノズル出口を底面とし、噴流中心軸上に頂点をもつ円錐形であるため、流速分布が一定になる長さは z/d_0 とともに小さくなっている。また、Fig. 5(a)および Fig. 5(b)では $z/d_0=4.5$ より大きく、Fig.5(c)では $z/d_0=5$ より大きい z/d_0 における流速分布は完全発達領域における流速分布であり、一様分布となっていることがわかる。

3.3 完全発達領域における軸方向流速分布の相似性

Fig.6(a), Fig.6(b), Fig. 6(c), に $d_0=14\text{mm}$, $d_0=20\text{mm}$, $d_0=30\text{mm}$ のノズルにおける完全発達領域での軸方向流速分布の相似性を見るために流速を最大流速 w_m で、また座標 r を流速半値幅 b (流速 w が最大流速 w_m の半値となる座標 r) で無次元表示した結果を示す。いずれの図においても速度分布はほぼ一本の曲線にそろっており、相似であると言える。従って、本実験で用いた供試ノ

ズルは標準的であることを確認できる。また、図中に Goertler 曲線, Gauss 曲線, Tollmien の解を描いて比較しているが、それらの曲線の式は下記のとおりである。ただし、Tollmien の解は数値解であるため式は無いので、数表が掲載された参考文献を示す。

Goertler 曲線

$$w/w_m = 1 / (1 + 0.414(r/b)^2)^2 \text{-----(1)}$$

Gauss 曲線

$$w/w_m = \exp(-0.693(r/b)^2) \text{-----(2)}$$

Tollmien の解 参考文献(7)参照

いずれの図においても実験値は噴流中心軸の近くでは Goertler 曲線とよく一致しており、逆に噴流の外縁側では Tollmien の解に最もよく一致している。この傾向は他の研究者による結果でも見られるものである^{(7)~(8)}。全体的に実験値は Gauss 曲線とよく一致している。

Fig.7, Fig.8 にこの無次元化に際して使用した最大流速および半値幅の分布を示す。

3.4 初期領域における軸方向流速分布の相似性の検討

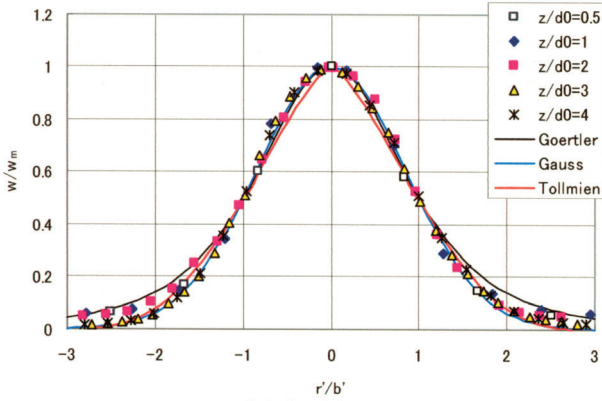
本実験の供試ノズルで形成される噴流の場合にも完全発達領域における速度分布は相似性があり、一本の曲線で表されることが確認された。しかし、初期領域における速度分布はポテンシャルコアの存在により Fig.5 で示したように速度分布の形状が全く異なるため、完全発達領域における速度分布と同様な無次元化法では相似分布を表すことができない。そこで、本研究では Fig.9(a)に示すような初期領域における速度分布の速度が一定である部分を Fig.9(b)のように左側(中心軸方向)へシフトし、ポテンシャルコアの部分を省略して無次元速度分布の相似性を検討する。そのシフト距離 s を各 z 断面におけるポテンシャルコアの半径として Fig.9(a)の分布をシフトすると Fig.9(b)のようになる。

これらの速度分布を最大速度 w_m と流速半値幅 b' で無次元表示すると Fig.10(a), Fig.10(b), Fig.10(c)のように一本の曲線で近似できるほどによくそろった相似曲線を得ることができる。この無次元速度分布を Goertler 曲線, Gauss 曲線および Tollmien の解と比較すると、実験値は Gauss 曲線に最もよく一致していることがわかる。

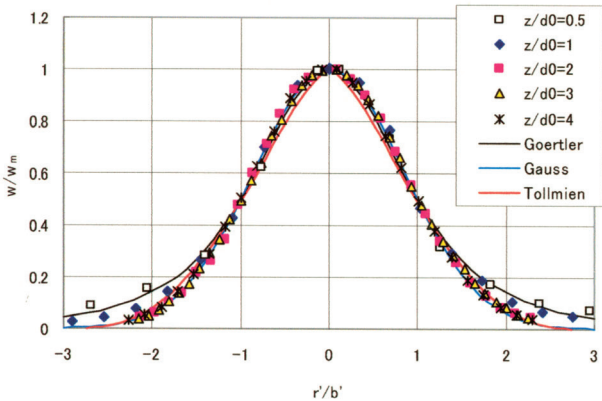
各 z 断面におけるシフト距離 s は、ポテンシャルコアの形がノズル出口を底面とする円錐形であるので、Fig. 11 のようになり、次式で表される。

$$s = (1 - z/z_p) d_0 / 2 \text{-----(3)}$$

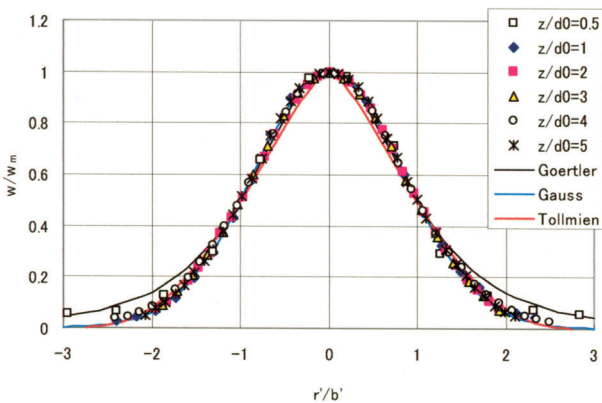
また、シフト後の半径を r' ($=r-s$) とし、 $r' \geq 0$ の部



(a) $d_0=14\text{mm}$



(b) $d_0=20\text{mm}$



(c) $d_0=30\text{mm}$

Fig.10 Similarity of velocity profiles in initial region

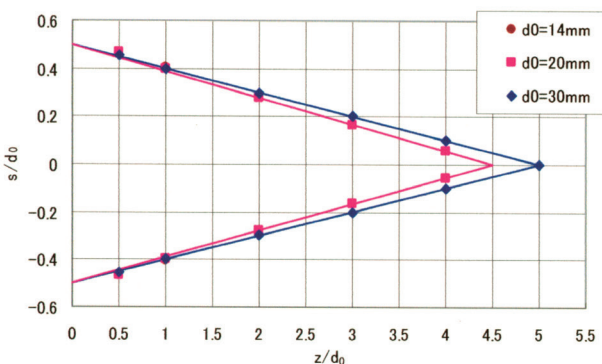


Fig.11 Shift length

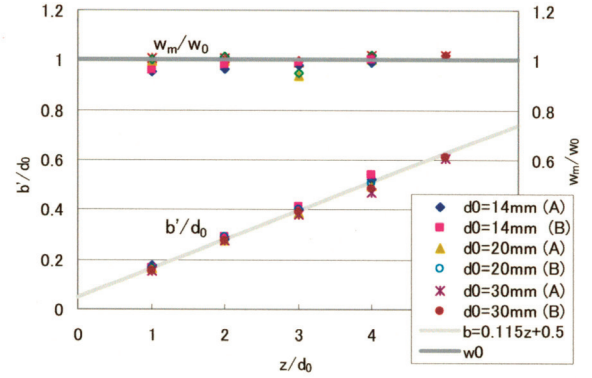


Fig.12 Half-value width and maximum velocity

分（混合領域）の流速分布を無次元表示した．この際に使用した最大流速 (w_m) および流速半値幅 (b') を Fig.12 に示す．その流速半値幅 (b') は次式で表すことができる．

$$b' = 0.115z + 0.5 \text{------(4)}$$

4. 結論

ノズル径 $d_0=14\text{mm}$, 20mm , 30mm の場合の軸対称噴流の中心軸上および $z/d_0=0.5$ から 14 までの z 断面上における噴流軸方向流速の r 方向分布を測定し，初期領域および完全発達領域における相似速度分布の求め方を検討した結果，次のような結論が得られた．

(1) 噴流中心軸上流速分布より得られるポテンシャルコア領域すなわち初期領域の長さは $d_0=14\text{mm}$ および $d_0=20\text{mm}$ のノズルの場合ノズル直径の 4.5 倍， $d_0=30\text{mm}$ のノズルではノズル直径の 5 倍となった．また，その乱れ強さ分布は初期領域では小さく， $z/d_0=7\sim 9$ の位置で最大となった．

(2) 全領域における軸方向流速の r 方向分布の測定結果より，ポテンシャルコアの形はノズル出口を底面とする円錐形であることを確認できた．

(3) 完全発達領域での r 方向流速分布はほぼ一本の曲線で表されるほどの相似性があり，Gauss 曲線で近似できることがわかった．

(4) 初期領域におけるシフト後の相似速度分布は Gauss 曲線で表されることがわかった．シフト距離は各 z 断面におけるポテンシャルコアの半径とすることが最も実用的であった．また，シフト後の半値幅の分布は直線で表すことができた．

参考文献

- (1) Bradshaw P. and Love E. M.: Aeronaut. Res. Council., R and M., 3205(1959),1.
- (2) Beltaos S. and Rajaratnam N.: J. of the Hydraulic Division of ASCE, 100-10(1974),1313.
- (3) 江良・齊間：機論，41-351(1975), 3259.
- (4) Giralt F., Chaia C. J. and Trass O. : Ind. Eng. Chem., Fundam., 16-1(1977),21.
- (5) Amano R. S.: Bull JSME, 26-221(1983),1891.
- (6) Costello F. A.: Journal of Applied Mechanics, Trans. Of ASME, 43-E-4(1976),551.
- (7) Rajaratnam.N (野村安生訳)：噴流，(1981)，森北出版
- (8) 社河内敏彦：噴流工学—基礎と応用—，(2004)，森北出版