

# 軸対称対向衝突噴流の流れについて

根本 光正\*・伊藤 昭夫\*\*・赤池 志郎\*

Experiments on Flow of Coaxial Impingement of Opposing Jets

Mitsumasa NEMOTO, Akio ITOH and Shiro AKAIKE

## Abstract

The mixing process of opposing jets by coaxial impingement in the mixing chamber of a reaction injection molding has not been clarified. This paper presents the results obtained from experiments for the coaxial impingement of opposing jets in the free space. Experiments were carried out for a pair of nozzles using air as working fluid. The effects of the mean velocity at the nozzle exit and the longitudinal distance between two nozzle exits on the flow after the impingement are discussed.

## 1. ま え が き

軸対称対向衝突噴流の工学的な応用例としては、例えば2種類の原液を混合室内で対向衝突噴流で混合させた後、その混合液を型に流し込み、型内で化学的に反応させ製品を成形する反応射出ウレタンフォーム成形法などがある。著者らはこれまで原液供給に高圧を必要とせずに混合効果を高めることのできる混合室の開発を目的として、油流による実験<sup>1)</sup>および水流による可視化実験<sup>2-4)</sup>をこれまで行ってきた。Charlesらも混合室内の衝突噴流の可視化実験から二つの噴流の混合を検討している<sup>5,6)</sup>。また Sivasgaramらも噴流列の対向衝突の可視化実験を行っている<sup>7)</sup>が、プローブ挿入等による混合室内の流れの直接測定が困難なこともあり、これまで二つの噴流の混合作用には不明な点が多い。

反応射出成形法では原液の粘度が高いために、稼働している原液のノズル内でのレイノルズ数  $Re$  は300程度であり、対向する二つの層流噴流が衝突することになる。著者らの一人は、対向して衝突する層流噴流が衝突後外周に放射状に広がるとして、衝突面近傍の流れを主に数値解析による検討を行っている<sup>8)</sup>。

フルイディクスに関連しては、山本らは二次元の対向衝突噴流について層流解、乱流解を求め、衝突面等の検討<sup>9,10)</sup>を行い、また二次元対向衝突噴流の発振現象についての実験的検討も行っている<sup>11)</sup>。軸対称同軸対向衝突噴流での乱流噴流の場合には、山本ら、Nomotoら、Fenger、小川らの研究がある<sup>12-15)</sup>が、いずれの場合も衝突面位置に関する研究である。

本研究は拘束された空間内で対向衝突する二つの噴流の流れの挙動を明らかにすることを目的とする。本報告では、まず基礎的な研究として軸対称で対向衝突する二つの噴流の特性を調べるため測定は自由空間で行った。作動流体には空気を用いた。流れの計測には三次元熱線プローブ流速計を使用し、対向する円筒ノズル(内径= $\phi 30$  mm)間の距離と噴流速度を変えて、流れの速度、乱れ強さおよびレイノルズ応力分布を測定した。また流れの可視化も加えて、ここでは主に衝突後の特性について検討した。

## 2. 記号および単位

- $b$ : 半値幅 (m, mm)
- $d$ : ノズル内径 (m, mm)
- $L$ : ノズル間の距離 (m, mm)
- $\Delta P$ : ピトー管の動圧 (Pa)
- $Q$ : 流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

1994年9月16日受理

\* 機械工学科

\*\* 大学院工学研究科機械工学専攻

- $U_c$ : ノズル出口の中心流速 (m/s)  
 $u_x$ : 衝突後の X 軸方向の速度成分 (m/s)  
 $u_y$ : 衝突後の Y 軸方向の速度成分 (m/s)  
 $u_z$ : 衝突後の Z 軸方向の速度成分 (m/s)  
 $u_{x0}$ : 衝突後の X 軸方向の中心流速 (m/s)  
 $u_x'$ :  $u_x$  の変動成分 (m/s)  
 $u_y'$ :  $u_y$  の変動成分 (m/s)  
 $u_z'$ :  $u_z$  の変動成分 (m/s)  
 $Re$ : レイノルズ数 ( $= U_c d / \nu$ )  
 $\rho$ : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\nu$ : 動粘度 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

### 3. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。本実験では作動流体として実験室内の常温常圧の空気を用いた。送風機①から整流ダクト②により整流された空気は、ベニア板(厚さ 30 mm)で箱型に製作した圧力調整箱③(寸法 230×350×440 mm)の中に送り込まれ、軸対称に取り付けられたアクリル製ノズル④(内径  $d = \phi 30$  mm, 全長 290 mm)から空気を噴出させて軸対称対向衝突噴流を形成する。特にノズルの取り付けられた圧力調整箱は、加圧による板のそりによってノズル中心のずれが生じないように頑丈なものとした。ノズル中心位置の調整は、同径の軸を両ノズル内に貫通して行った。

流れの計測には三次元熱線プローブ流速計(米国 TSI 製, システム IFA-100)を用いた。三次元プローブ(図2)を用いることによって得られる基本的なデータは、すべての直交成分についての平均流速, 乱流強

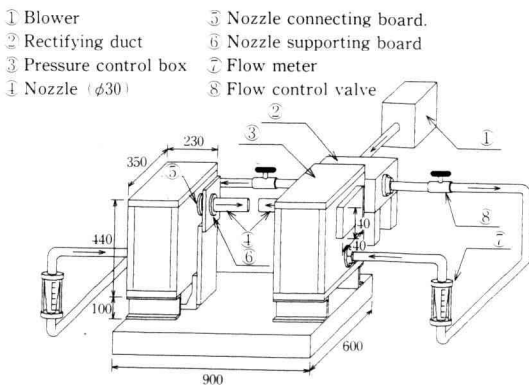


Fig. 1. Schematic view of experimental apparatus (Unit: mm)

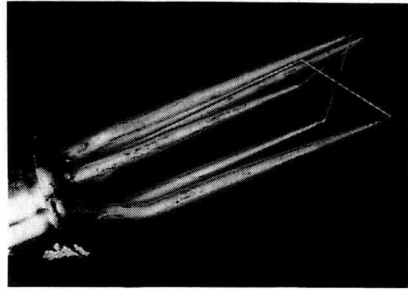


Fig. 2. Triple hot-wire probe of anemometer

度, 流れの方向のスキューネス, 平坦度, レイノルズせん断応力である。

ノズル出口中心流速  $U_c$  は, 出口の中心にピトー管を設置し, デジタルマノメータ(日立製, PMS-4-2L 形, 最大 2 kPa)にて動圧  $\Delta P$  を測定し, 式 (1) より求めた。

$$U_c = \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho} \quad (1)$$

ただし, 三次元熱線プローブによる衝突後の流れの計測時には, ピトー管は噴流外にずらした。

衝突噴流は, 図3に示すような直径  $d = \phi 30$  mm の一対の対向ノズルによって形成した。流量  $Q$  の測定はフローメータ(立花計測製, 最大流量 700  $\text{l}/\text{min}$ )を用い, ノズル出口でのレイノルズ数は  $Re = 2.54 \times 10^4$  (ノズル出口平均流速 = 10 m/s)  $\sim 5.03 \times 10^4$  (同 = 20 m/s) で行った。衝突後の噴流の流れの計測位置は, Y 軸方向の距離  $y = 0$ , Z 軸方向の距離  $z = 0$ , X 軸方向の距離  $x = 20 \sim 120$  mm まで 5 mm づつ 21 点で, ノズル間  $L = 20$  mm のときの Y 軸方向の距離  $y = -20 \sim 20$  mm まで 2 mm づつ 21 点,  $L = 30, 40, 50$  mm のときは,  $y = -30 \sim 30$  mm まで 3 mm づつ 21 点について測定を行った。なお, 計測用の三次元プローブは微

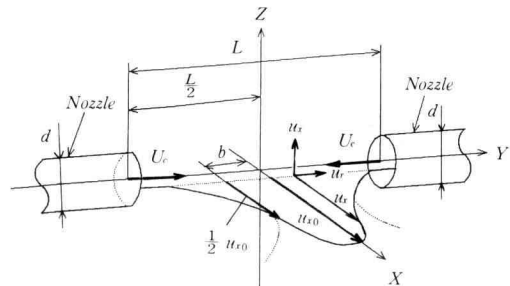
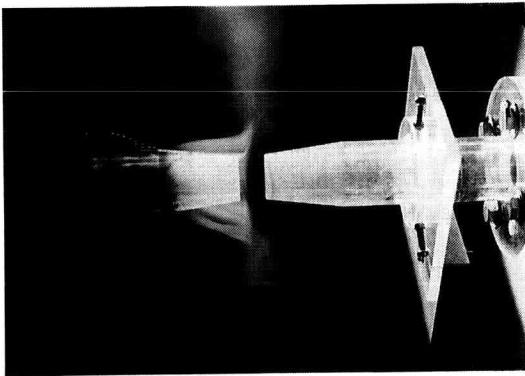


Fig. 3. Detail of measuring section

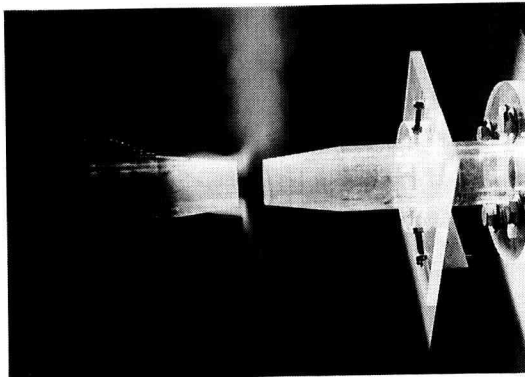
少移動が可能である三次元トラバース装置に取り付けてある。

#### 4. 実験結果及び考察

図4(a), (b) は, ノズル間距離がノズル内径よりも小さい  $L/d=0.67$  の場合で,  $Re=1.41 \times 10^4, 2.82 \times 10^4$  での衝突噴流の流れの様子を油ミスト法により可視化した一例を示している。煙には軽油を温めて発生させたミストを用い, 煙を吹き出すノズルは噴流に影響を及ぼさないようにノズルの外側で自然供給されるように配置した。図4(a), (b) から, 噴流衝突後は半径方向に放射状に広がっていることがわかる。衝突直後ではその周りの空気の巻き込みが見られ, その後乱れて拡散していく様子がわかる。

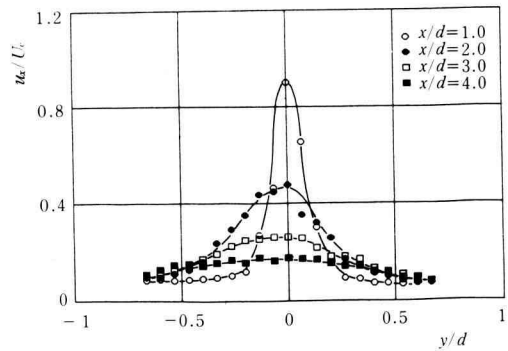


(a)  $Re=1.41 \times 10^4$

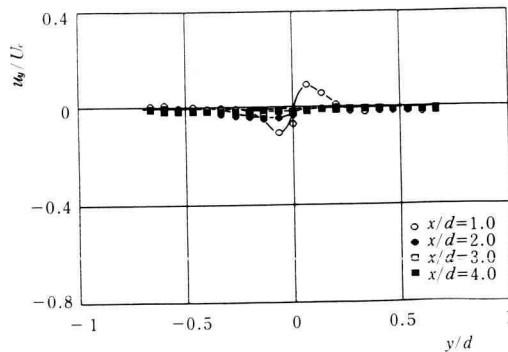


(b)  $Re=2.82 \times 10^4$

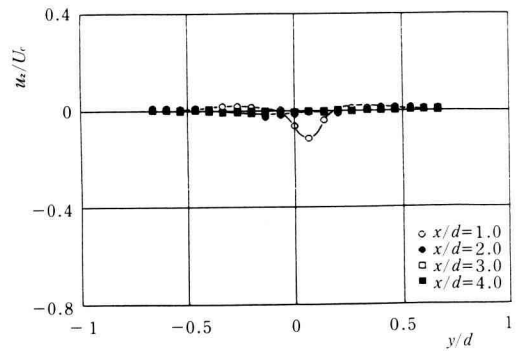
Fig. 4. Photographs of flow after impingement of opposing jets (Oil mist method)



(a) X-axis component



(b) Y-axis component



(c) Z-axis component

Fig. 5. Velocity profiles of flow after impingement ( $L/d=0.67, Re=2.54 \times 10^4$ )

図5(a), (b) および (c) は,  $L/d=0.67$  で  $Re=2.54 \times 10^4$  の軸対称対向衝突噴流の衝突後の速度分布の, X 軸, Y 軸および Z 軸方向の速度成分を示す。横軸には Y 軸方向の距離  $y$  (プローブの測定位置) をノ

ズル内径  $d$  で無次元化した無次元距離  $y/d$  を、縦軸は測定点における各軸方向速度成分をノズル出口の中心流速  $U_c$  で無次元化した無次元速度  $u_x/U_c$ ,  $u_y/U_c$  および  $u_z/U_c$  を示している。図 5(a) より、衝突後の流れが発達していく様子がわかり、図 5(b) での  $u_y$  の存在は、衝突中心部に近い  $x/d=1.0$  のしかも  $X$  軸中心部付近のみにみられ、衝突噴流の衝突部での複雑な巻き込みによる影響が予測でき、また図の点対称性から  $Y$  軸の正負方向には均等に広がっていることもわかる。図 5(c) の  $Z$  軸方向速度成分  $u_z$  では、中心付近で  $u_z$  が大きく、 $y$  が大きくなるに従って  $u_z$  は減少し、一旦反対方向の速度成分を示した後に  $u_z$  は 0 になる。これも流れの巻き込みが大きくなるのが原因であり、衝突直後の流れは単純な二次元ではなく複雑な三次元流れとなっており、その成分が現れていると思われる。この  $Z$  成分も  $x/d$  が小さいところのみ見られる。

図 6 は、衝突後の  $u_x$  速度分布を表している。図中には式 (2) の放射状噴流 (2 つの近接した平行な円板の間のすきまから静止流体中に吹き出す放射状流れ) の場合の Göertler の式も示している<sup>16)</sup>。

$$u_x/u_{x0} = 1 - \tanh^2[0.88 (y/b)] \quad (2)$$

横軸に  $Y$  軸方向の距離  $y$  を半値幅  $b$  (衝突後の  $X$  軸方向の中心流速の半分 ( $u_{x0}/2$ ) のところの噴流の幅) で無次元化した無次元半値幅  $y/b$  を、縦軸に  $X$  軸方向の流速  $u_x$  を  $X$  軸方向の中心流速  $u_{x0}$  で無次元化した無次元速度  $u_x/u_{x0}$  を示している。測定結果より実験値の速度分布では、噴流の衝突による巻き込みが生じていると思われ、外側 ( $y$  が大きい) では Göertler の

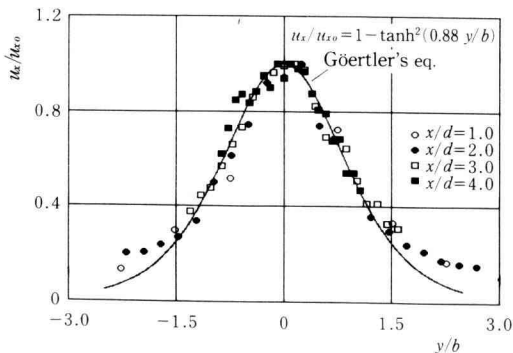


Fig. 6. Comparison with theoretical value of  $X$ -axis velocity component ( $L/d=0.67$ ,  $Re=2.54 \times 10^4$ )

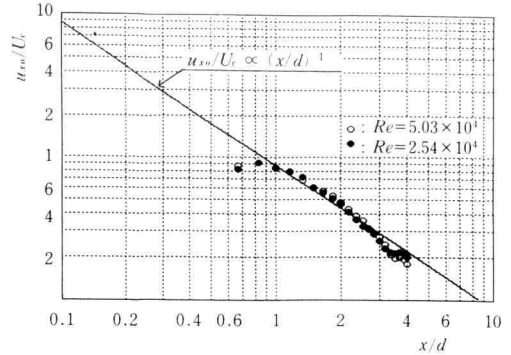


Fig. 7. Variation of center velocity on  $X$ -axis of flow after impingement ( $L/d=0.67$ )

式より大きくなっていることがわかる。

これらの結果から、 $X$  軸上での中心速度  $u_{x0}$  の変化を図 7 に示した。横軸に  $X$  軸方向の距離  $x$  をノズル内径  $d$  で無次元化した無次元距離  $x/d$  を、縦軸に衝突後の  $X$  軸方向の中心流速  $u_{x0}$  をノズル出口の中心流速  $U_c$  で無次元化した無次元速度を示している。軸対称対向衝突噴流の衝突後の中心速度の変化は、 $x/d \geq 1$  から  $u_{x0} \propto x^{-1}$  の関係にて減衰していることがわかり、このことは次元単噴流の場合と同様である。

同様に  $x/d$  に対する半値幅の変化を示したのが図 8 である。横軸に  $X$  軸方向の距離  $x$  をノズル内径  $d$  で無次元化した無次元距離  $x/d$  を、縦軸に半値幅  $b$  をノズル内径  $d$  で無次元化した無次元半値幅を示している。軸対称対向衝突噴流の衝突後の半値幅の変化は、 $b \propto x$  の関係にて増大していることがわかり、次元単噴流及び次元単噴流と同様である。

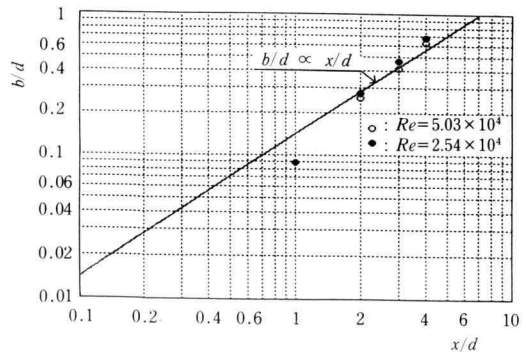
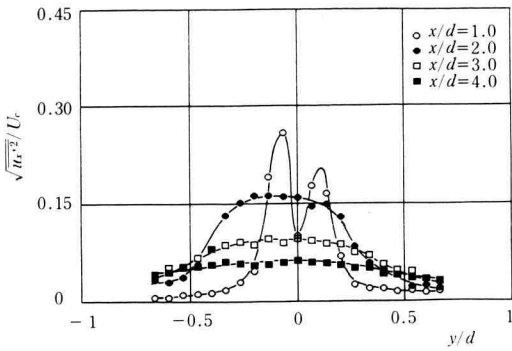
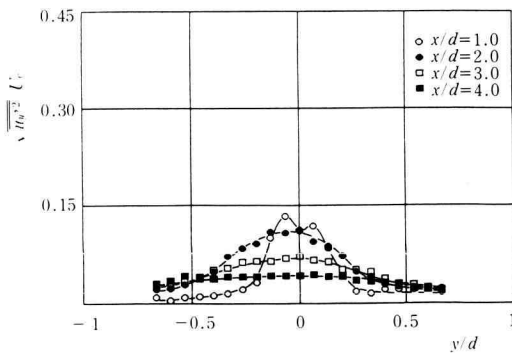


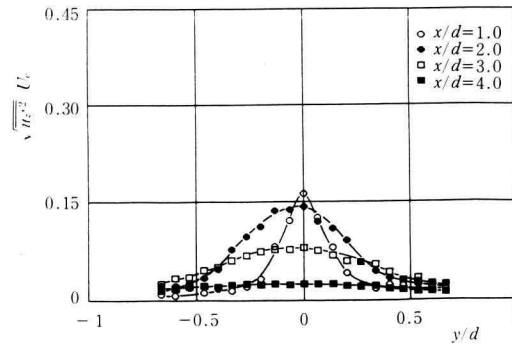
Fig. 8. Variation of radial flow of flow after impingement ( $L/d=0.67$ )



(a) X-axis component



(b) Y-axis component



(c) Z-axis component

Fig. 9. Turbulent intensity profiles of flow after impingement ( $L/d=0.67$ ,  $Re=2.54 \times 10^4$ )

図9(a), (b)および(c)は、 $L/d=0.67$ で $Re=2.54 \times 10^4$ の場合の軸対称対向衝突噴流の衝突後の乱れ強さのX軸、Y軸およびZ軸方向成分の分布の変化を示す。横軸にY軸方向の距離 $y$ をノズル内径 $d$ で無次元

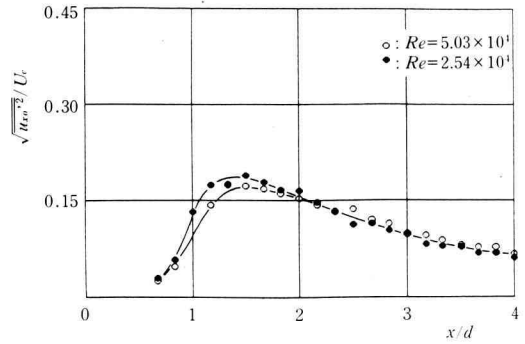


Fig. 10. Turbulent intensity profiles on X-axis of after flow impingement ( $L/d=0.67$ ,  $Re=2.54 \times 10^4$ )

元化した無次元距離 $y/d$ を、縦軸に衝突後の乱れ強さを示している。図9(b), (c)よりY、Z軸方向の乱れ強さは衝突直後( $x/d=1.0$ )では衝突面付近( $y/d=0$ 前後)での乱れは大きく、図9(a)よりx軸方向の乱れ強さも同様の傾向を示すが、 $x/d$ の小さい( $x/d=1.0$ )場合には衝突面の中心付近では乱れが周辺より小さくなっている。

図10は、 $L/d=0.67$ で $Re=5.03 \times 10^4$ ,  $2.54 \times 10^4$ の軸対称対向衝突噴流の衝突後の放射状方向での中心の乱れ強さの変化を示している。横軸にX軸方向の距離 $x$ をノズル内径 $d$ で無次元化した無次元距離 $x/d$ を、縦軸に衝突後の乱れ強さを示している。図9(a)での衝突後の乱れ強さの分布で述べたように衝突面の中心付近( $x/d < 1$ )では乱れが弱く、一旦 $x/d=1.3$ 付近でX軸方向の中心の乱れ強さが最大0.2になり、その後離

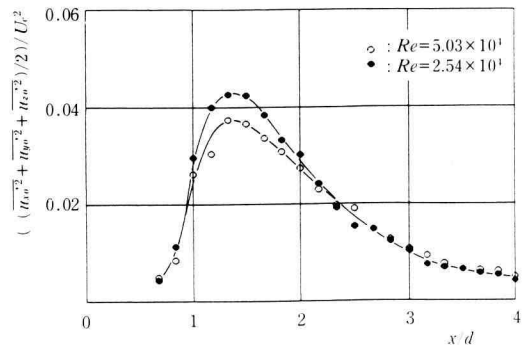


Fig. 11. Turbulent energy profiles on X-axis of after flow impingement ( $L/d=0.67$ )

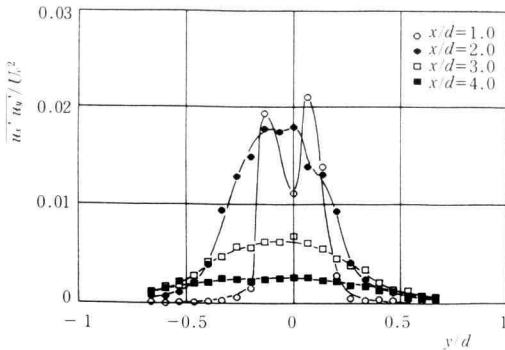


Fig. 12 Reynolds stress profiles on X-axis of after flow impingement ( $L/d=0.67$ ,  $Re=2.54 \times 10^4$ )

れるに従い減衰していくことがわかる。

図 11 は、 $L/d=0.67$  で  $Re=5.03 \times 10^4$ ,  $2.54 \times 10^4$  の軸対称対向衝突噴流の衝突後の中心の乱れエネルギーの変化を示している。横軸に X 軸方向の距離  $x$  をノズル内径  $d$  で無次元化した無次元距離  $x/d$  を、縦軸に衝突後の乱れエネルギーを示している。衝突面の中心付近 ( $x/d < 1$ ) で乱れエネルギーが小さく、一旦  $x/d=1.3$  付近で乱れエネルギーが最大 0.04 になり、離れるに従いその後滑らかに減衰している。これは前述の乱れ強さの変化と同じ傾向を示している。

図 12 は、 $L/d=0.67$  で  $Re=2.54 \times 10^4$  の軸対称対向衝突噴流のレイノルズ応力の分布を示している。横軸に Y 軸方向の距離  $y$  をノズル内径  $d$  で無次元化した無次元距離  $y/d$  を、縦軸に衝突後の無次元化したレイノルズ応力を示している。衝突面に近い  $x/d=1.0$  ではレイノルズ応力の分布は乱れており、 $x/d=2.0$  からは軸対称対向衝突した噴流がよく混合していることがわかる。

## 5. ま と め

軸対称対向衝突噴流の流れの特性を実験的に検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 平行円板間から噴出される放射状噴流の速度分布を示した Göertler の式と実験値を比較すると、実験値の方がすそでの流速が大きく軸対称対向衝突噴流の衝突後の速度分布には巻き込みの影響がみられる。

(2) 軸対称対向衝突噴流の衝突後の中心速度の変化は、 $x/d \geq 1$  からは  $u_{x0} \propto x^{-1}$  で減衰していることが

わかり三次元単噴流と同様である。

(3) 軸対称対向衝突噴流の半値幅の変化は、 $b \propto x$  で増大していることがわかり、二次元単噴流及び三次元単噴流と同様である。

(4) 衝突後の乱れ強さの中心の変化において、衝突面の中心付近 ( $x/d < 1$ ) では乱れが弱く、一旦  $x/d=1.3$  付近で X 軸方向の中心の乱れ強さが最大 0.2 になり、その後離れるに従い減衰していくことがわかった。

(5) 軸対称対向衝突噴流の衝突後の中心の乱れエネルギーの変化は、衝突面の中心付近 ( $x/d < 1$ ) で乱れエネルギーが小さく、一旦  $x/d=1.3$  付近で乱れエネルギーが最大 0.04 になり、その後離れるに従い滑らかに減衰している。これは前述の中心の乱れ強さの変化と同じ傾向を示した。

## 6. 謝 辞

本研究にご協力いただいた本学の中根一朗助手ならびに当時本学学部生飯塚良彦君に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 赤池・根本, 幾徳工業大学研究報告, B, 8 (昭 58), 73.
- 2) 赤池・根本・石綿, 流れの可視化, 4-14 (昭 59), 191.
- 3) 赤池・根本・石綿, 流れの可視化, 5-Suppl. (昭 60), 95.
- 4) 赤池・根本・石綿, 幾徳工業大学研究報告, B, 10 (昭 61), 1.
- 5) Charles, I., ほか 2 名, Polymer Eng. and Sci., 20-13 (1980), 875.
- 6) 文献 (5) の p. 887.
- 7) Sivasgaram, S. and Whitelaw, J.H., PIME, 200-C1 (1986), 71.
- 8) 赤池, 機論, 54-501, B (昭 63-5), 1034.
- 9) 山本・ほか 3 名, 油圧と空気圧, 6-6 (昭 50-11), 287.
- 10) 山本・ほか 2 名, 油圧と空気圧, 7-2 (昭 51-3), 89.
- 11) 山本・ほか 3 名, 油圧と空気圧, 6-2 (昭 50-3), 68.
- 12) 山本・ほか 2 名, 油圧と空気圧, 6-4 (昭 50-7), 188.
- 13) Nomoto, A., ほか 2 名, Proceedings of 2nd Inter-JSME Symp., Fluid Machinery and Fluidics, 3 (1972), 71.
- 14) Fenger, N.P., 4th Cranfield Conf. Paper, P1

- (1970).
- 15) 小川・牧・ほか1名, 機論, 57-535, B (平 3-3), 935.
- 16) N.ラジャラトナム原著・野村安正訳, 噴流, 森北出版, (1981-7), 47.