

噴流に関する流れの可視化実験

赤池 志郎・根本 光正・石綿 良三

Flow Visualization of Jets

Shiro AKAIKE, Mitsumasa NEMOTO and Ryozo ISHIWATA

Abstract

This paper presents the experimental results of flow visualization of jets, which was carried out in a series of the study to verify the flow mixing of coaxial impingement of opposing jets in the mixing chamber of reaction injection molding. Submerged laminar jet and opposing jets in two mixing chambers were visualized by the hydrogen bubble method and the color tracer injection method by using water as working fluid.

The flow pattern in the developing region of the submerged laminar jet was made clear. Photographs showed the existence of a potential core. The impingement surface and the flow downstream of it of the opposing jets were visualized. The mixing effect of the jets was proved from the photographs to some extent.

1. ま え が き

ウレタンフォーム成形に用いられる反応射出法で、原液供給に高圧を必要とせず混合効果をもつことのできる混合室の開発を目的とした油による対向衝突噴流の実験結果はすでに報告した¹⁾。なお、この実験では二つのノズルから同一油を噴出しているため、衝突後の流れの混合状態を明らかにすることはできなかった。一方、実機で衝突させる原液の噴流はノズル内径とそこでの平均速度に基づくレイノルズ数が300程度であるから、その噴流はノズル出口近傍では層流である。このような層流噴流を対象として、ノズル出口近傍の流れの理論的、実験的研究も著者らはすでに行っている^{2,3)}。

対向衝突噴流の特性⁴⁾、反応射出法の混合室内の衝突噴流の特性^{5,6)}を調べたものはいくつかあるが、拘束された空間内（混合室内）で対向衝突する二つの噴流の流れの混合作用はこれまで明らかにされていないようである。なお、衝突噴流の流れをプローブ等による直接測定は困難であり、混合作用を調べるためには流れの可視化は有効な手段といえる。

本報告は、前述の混合室の開発を目的とした研究で

に行われた各種噴流の可視化実験の結果を示す。実験は単一噴流のノズル出口近傍の流れと2種類のモデル混合室内の対向衝突噴流について行い、流れの可視化は水流を用い水素気泡法と色素注入法によって行った。ノズルからの単一噴流ではノズル近傍に存在するポテンシャルコアが可視化できた。また対向衝突噴流の可視化では二つの噴流の混合状態をある程度明らかにすることができた。

2. 実験装置および方法

2.1 層流噴流の可視化実験

実験は水流を用い、水素気泡法によって単一層流噴流の可視化を行った。装置の概略を図1に示す。供試水槽内に仕切り①を設け水槽②に水道水を供給（一部の実験では補助水槽を経て供給）し、そこでオーバーフローさせて一定ヘッドを保つようにしている。バルブ④により水槽②と③に水面差を作り、仕切り板に設けられたノズル⑤から定常な層流噴流を水槽③内に噴出させる。水槽は透明な塩化ビニール板で製作されており、ノズルはアクリル製である。

ノズルは図2に示す断面形状のものと、ノズル出口で十分発達した層流分布の噴流を作るための内径φ10 mm、長さ320 mmの円管を用いた。後者を以下バ

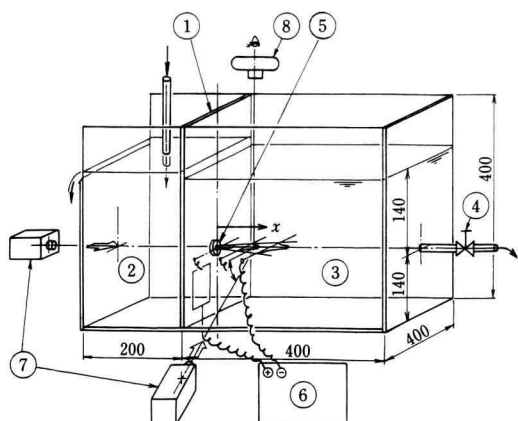


Fig. 1. Skelton view of equipment (unit, mm).

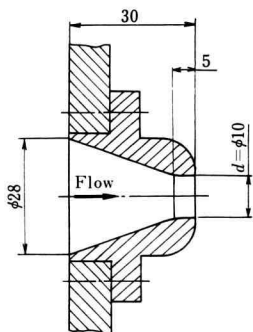


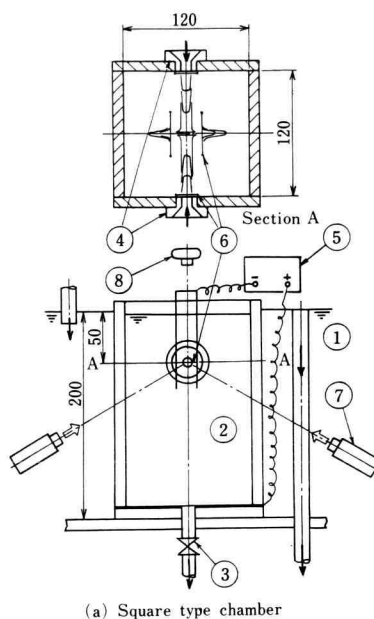
Fig. 2. Cross section of supply nozzle (unit, mm).

イブノズルと呼ぶことにする。

ノズル出口直後の中央断面上に外径 $50 \mu\text{m}$ のタングステン線を張り、パルス発生器 (計測技研製) でパルス電圧 (50~100 V) を与えて水素気泡を発生させる。バルブ調整後、流れが十分定常になったときに上部のステルカメラ ⑧ で写真撮影した。流量はバルブ ④ の出口で量水した。

周囲を暗くしてスライド用プロジェクター (650 W, 2台) ⑦ から噴流中心断面にスリット光を与えて写真撮影した。フィルムにはフジネオパン (ASA 400) を使い、バンドールにて4倍 (ASA 1600 相当) の増感現象を行った。

実験はレイノルズ数 $Re = \bar{v}d/\nu$ (\bar{v} : ノズル出口の平均速度, d : ノズル内径, ν : 動粘度) = 50~1,000 について行った。



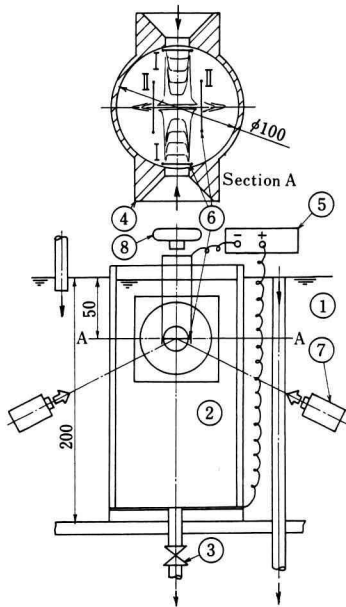
(a) Square type chamber

(b) Nozzle

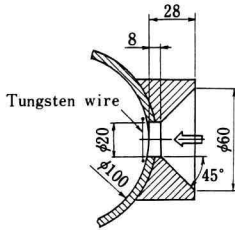
Fig. 3. Schematic view of apparatus (unit, mm).

2.2 対向衝突噴流の可視化実験

2種類のモデル混合室内の対向衝突噴流の流れの可視化を行った。表面積 $600 \times 600 \text{ mm}^2$ の外水槽内に設けられた図3に示す $120 \times 120 \text{ mm}^2$ の角形混合室モデルと図4に示す内径 $\phi 100 \text{ mm}$ の円形混合室モデルについて実験を行った。ノズルはそれぞれの図(b)に示すような断面形状をしており、ノズル出口から衝突面までの距離 x とノズル径 d との比 $X = x/d$ は角形が $X = 6$ 、円形が $X = 2.5$ である。モデルは実際の混合室の約10倍の大きさで、両ノズルの軸中心あわせには十分注意をはらった。



(a) Circular type chamber



(b) Nozzle

Fig. 4. Schematic view of apparatus (unit, mm).

外水槽①に水道水を供給し、水槽内でオーバーフローさせて水位を一定に保つようになっている。混合室下面の中央に設けられている流出管のバルブ③により外水槽①と混合室②に水面差を作り、対向した二つのノズル④からの噴流を対向衝突させる。ノズル中心断面上にノズル出口と衝突側面とに2対(計4箇所)のタングステン線I, II⑥を張り、水素気泡を発生させた。なお、円形混合室では衝突面の混合状態をより明らかに可視化するために、図5に示すノズルを作り3箇所の小孔から色素を混合室内に注入する実験も行った。色素としてはポスターカラーを用いた。

写真撮影条件等は単一噴流と同じであるが、円形混合室の色素注入の場合にはフジカラーフィルム ASA 1600を用いた。

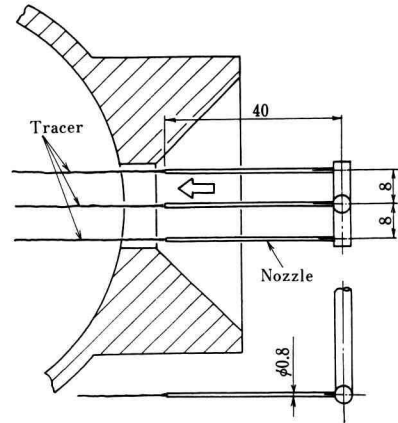


Fig. 5. Color tracer injection nozzles (unit, mm).

流量はバルブ③の出口にて量水し、実験は一つのノズルからのレイノルズ数 $Re=100\sim 1,200$ について行った。

3. 実験結果

3.1 層流噴流の可視化

前述の方法により静止水中に噴出するノズルとパイプノズルからの水噴流の流れの可視化を水素気泡法で行った。図6はノズルからの噴流の可視化写真例を示す。いずれの写真もパルス間隔 $T=0.2\text{ s}$ のもので、ノズル出口近傍の噴流中心部に速度が一定なポテンシャルコアの存在が可視化できている。これらの噴流はノズル出口近傍では層流であるが、いずれの噴流もノズルから十分離れた所では乱流に遷移する。図(c), (d)のレイノルズ数の大きいもの ($Re=641, 879$) では、ノズルから離れるにしたがい噴流は不安定になり、写真でも噴流は多少揺らいている。

レイノルズ数 Re の小さいものではノズル出口でコアの半径は小さいが、 Re が大きくなるにしたがいコア半径が大きくなり³⁾、ノズル出口で一様な速度分布に近づいてくる。さらに Re を大きくして流れを乱流にすると、ノズル出口では Re に無関係にほぼ一様な速度分布になる³⁾。

ノズル近傍のポテンシャルコアが存在する流れの展開領域を経て、流れが完全発達領域に入るまでのノズルからの距離 x_c は乱流の場合、 Re に無関係に $x_c/d \approx 11$ である⁷⁾ が、層流の場合にはこの距離も Re によって相違する。著者らはホットフィルムプローブによる

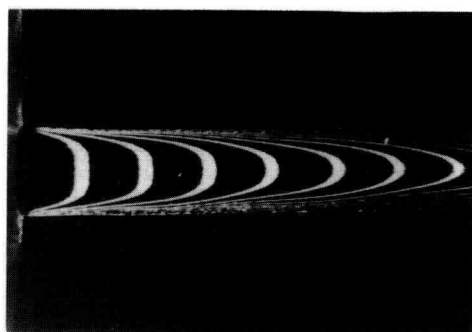
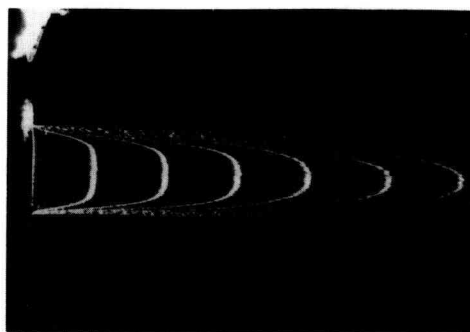
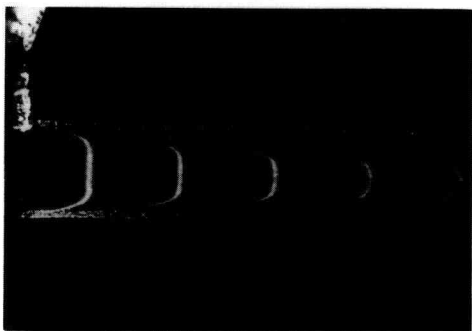
(a) $Re=221$ (b) $Re=443$ (c) $Re=641$ (d) $Re=879$

Fig. 6. Photographs of submerged laminar jet from nozzle issuing into surrounding calm water (pulse interval $T=0.2$ s).

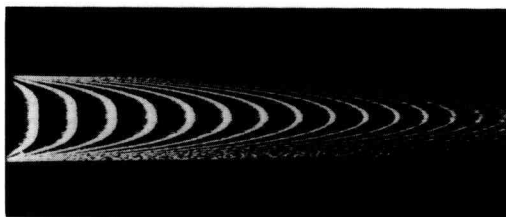
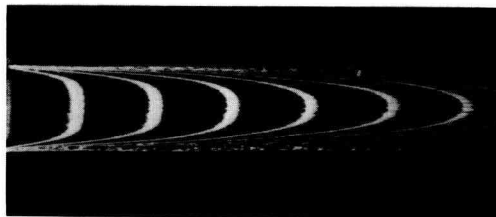
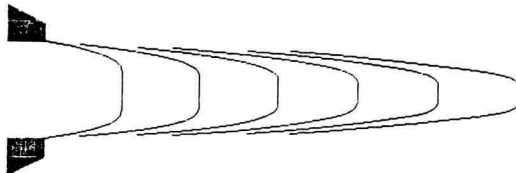
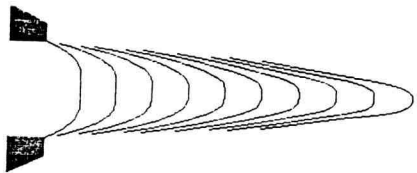
(a) $Re=147$ (b) $Re=304$ 

Fig. 7. Flow pattern near nozzle exit ($T=0.2$ s).

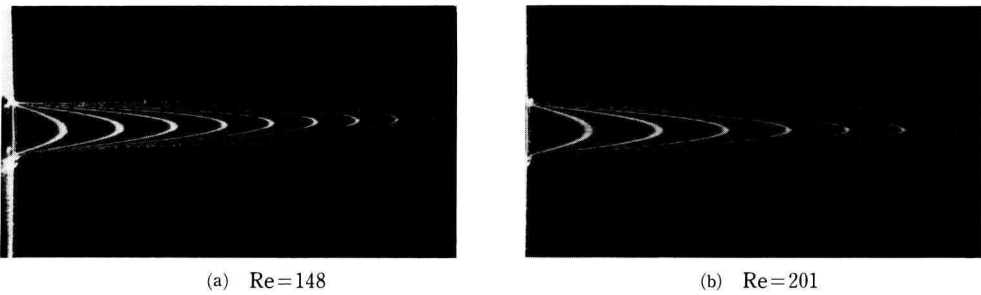


Fig. 8. Photographs of submerged laminar jet from pipe nozzle ($T=0.3$ s).

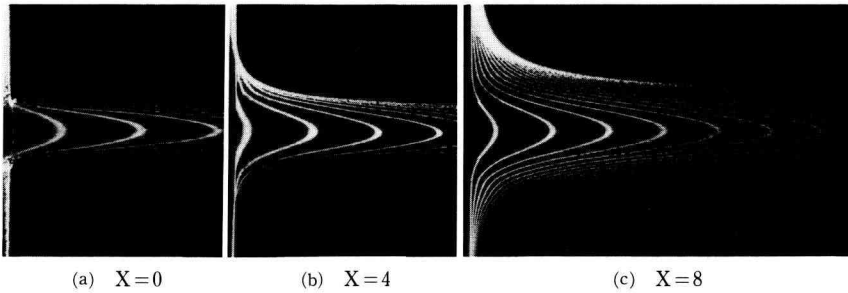


Fig. 9. Photographs of submerged laminar jet from pipe nozzle ($Re=210$, $T=0.3$ s).

測定結果から $(x_c/d)/Re \approx 0.04$ であることを求めている³⁾。なお、可視化写真からもこれらの傾向は見られるが、定量的な流れの測定は写真からでは不可能である。これは流れの可視化に水素気泡を用いているので下流側で気泡が多少浮上するためであり、噴流の広がりについても可視化することができなかった。

図7は可視化写真と著者らが行った数値解析によるフローパターンとを比較したものである。ノズルから離れたところで多少数値解のほうがコア半径が大きい。これは前述の気泡の浮上によるものであり、流れの計測結果と数値解はよく一致している³⁾。

図8にパイプノズルからの噴流の可視化写真を示す。パイプ出口で流れは完全に発達した放物線状の層流分布になっているのがわかる。

図9にはパイプノズルからの噴流の広がりがよくわかるように、ノズルからの距離 $X=x/d=4$ と8での写真を同時に示す。噴流がノズルから離れるにしたがって広がりながら発達していく過程が写真からわかる。Rankinらの研究によるとこの種の噴流が完全発達領域になるのは $X/Re \geq 0.036$ であり⁸⁾、図(c)は $X/Re=0.038$ であるから噴流が完全に発達した領域の可視化写真である。これまでよく知られている層流噴流

の完全発達領域の Schlichting の分布⁹⁾ になっているのが同写真からわかる。

3.2 混合室内の対向衝突噴流の可視化

3.2.1 角形混合室

ノズル出口にタングステン線 I を張って(図3参照)二つの対向する噴流の衝突面を水素気泡で可視化した写真例を図10(a)~(e)に示す。それぞれ同じレイノルズ数 Re についてパルス間隔 T を変えた2種類の写真を示す。図(a)は $Re=127$ のもので衝突は安定しており、衝突後も流れは外周にきれいに分かれる。また Re が小さいため衝突前の噴流にポテンシャルコアはほとんど見られない。図(b)は $Re=204$ のもので、 $Re=127$ とほとんど相違しない。図(c)、(d)の $Re=302$, 492 のものでは衝突は不安定であり、衝突面は外乱によって変動しやすい。これらの噴流にはポテンシャルコアが見られ、衝突は噴流が完全な発達領域に達する前に行われている。図(e)の $Re=624$ のものでは、噴流の衝突は安定してくるが、衝突後の流れにただちに乱れが発生するようになる。

図3のように衝突面の側面にタングステン線 II を張って衝突後の流れを可視化した写真例を図11(a)

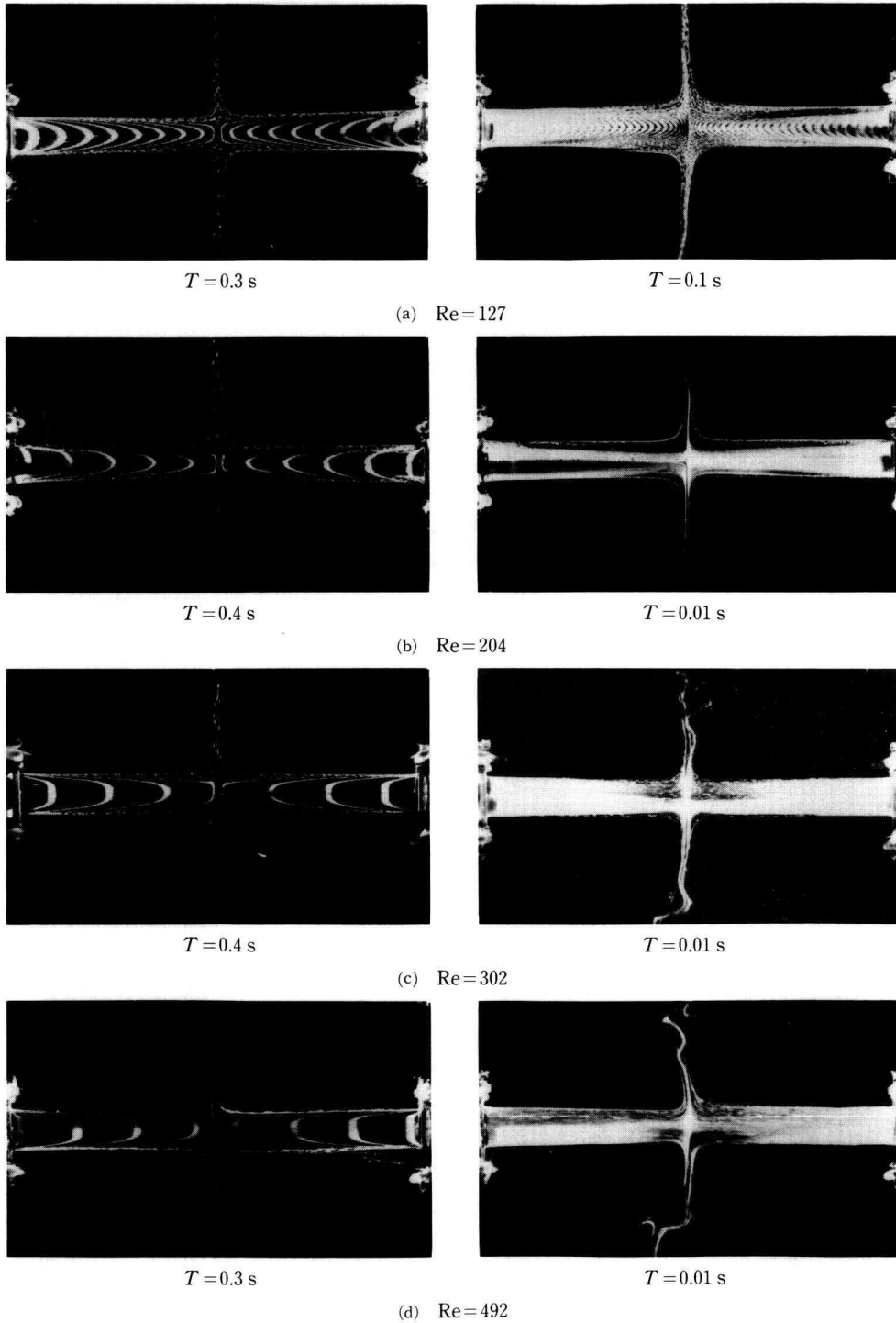


Fig. 10. Photographs of coaxial impingement of opposing jets in square type chamber.

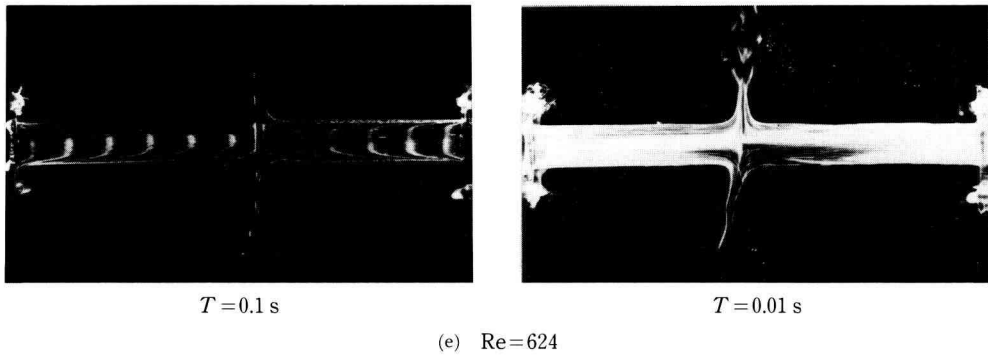


Fig. 10. Photographs of coaxial impingement of opposing jets in square type chamber.

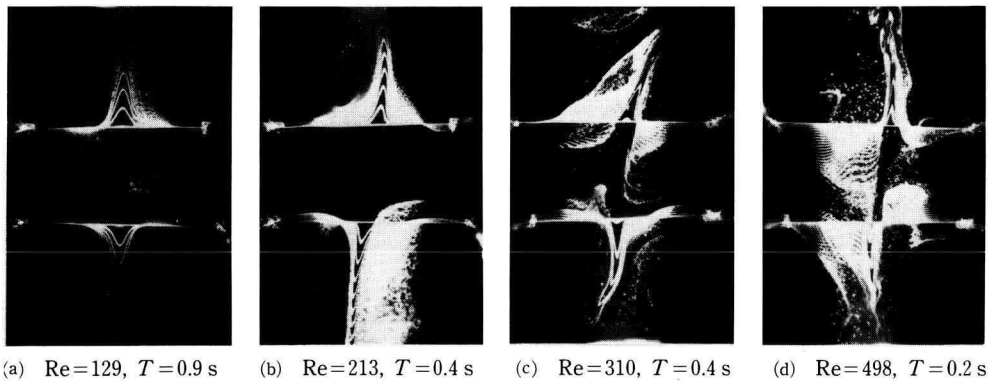


Fig. 11. Photographs of flow downstream of impinging surface.

～(d)に示す。レイノルズ数の小さいものほど衝突後の流れの広がりが大きくなる傾向がある。 Re によって衝突後の流れが不安定になっていく様子をこれらの写真は示している。

上記の流れの可視化から角形混合室内の対向衝突噴流の流れは、レイノルズ数によっておおよそ下記のように分類できる。

- (1) $Re \leq 200$: 衝突噴流の流れは安定しており、噴流は衝突後外周にきれいに分かれる。
- (2) $200 \leq Re \leq 500$: 噴流の衝突面は不安定で、小さい外乱によってもただちに変動する。
- (3) $Re \geq 500$: 衝突面位置は安定するが、衝突前の噴流に多少揺らぎが存在するようになる。また衝突後の流れに乱れがただちに生じる。

3.2.2 円形混合室

円形混合室についても角形混合室と同様な実験を

行った。対向衝突噴流の可視化写真例を図 12(a)～(h)に、衝突後の流れの写真例を図 13(a)～(d)に示す。

衝突噴流の流れの傾向は角形混合室の結果と同様であるが、ノズル径にくらべて混合室断面が角形より小さいので、衝突後の流れの混合室壁面ではね返りも可視化できている。

円形混合室では衝突面をさらによく可視化するために、片側の噴流にだけタングステン線を張った実験も行った。片側からの噴流の衝突面の可視化写真例を図 14 に示す。レイノルズ数が大きくなるにしたがって衝突面が乱れていく様子がこれらの写真からよくわかる。

色素注入法による可視化写真例を図 15(a)～(f)に示す。写真はカラー撮影されており、同じレイノルズ数についてそれぞれ片側と両側の噴流から色素を注入したものを示してある。

図 15(a)は $Re=132$ のもので、二つの対向噴流は衝

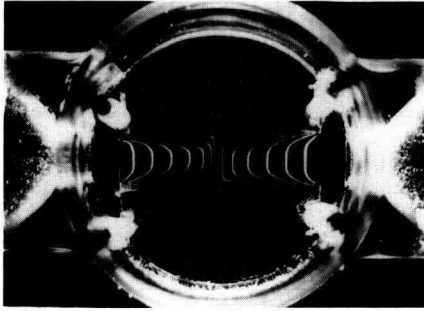
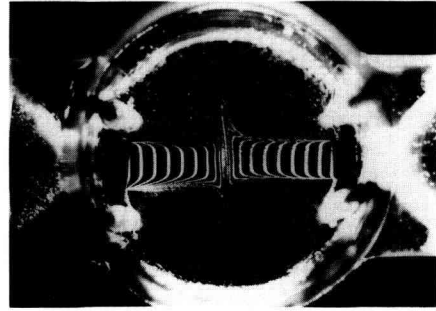
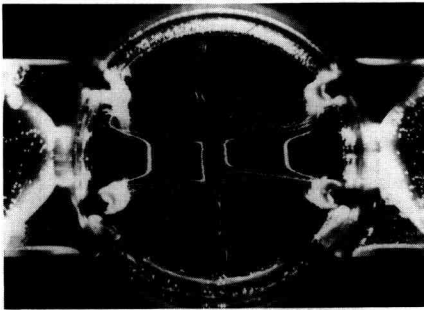
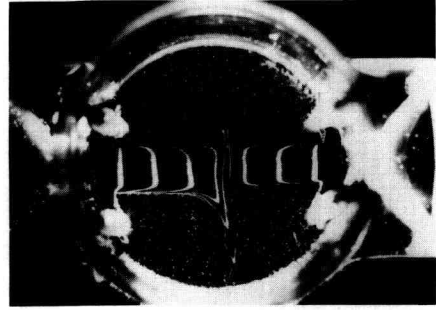
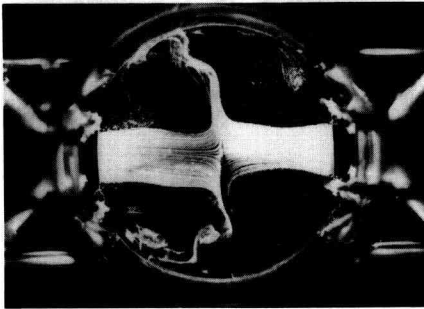
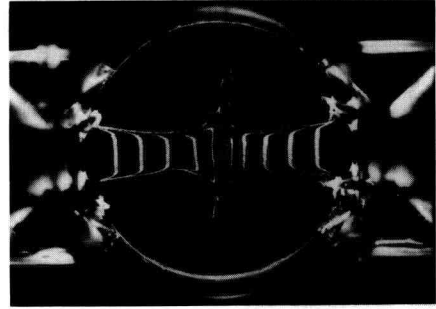
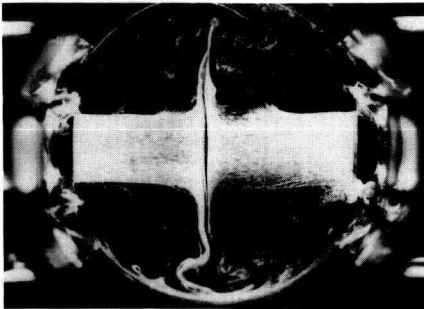
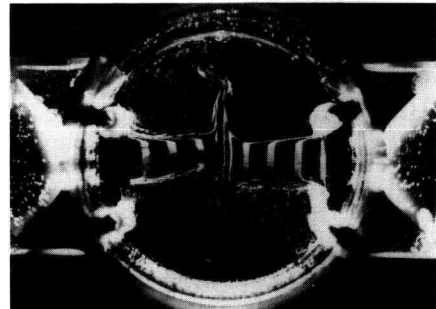
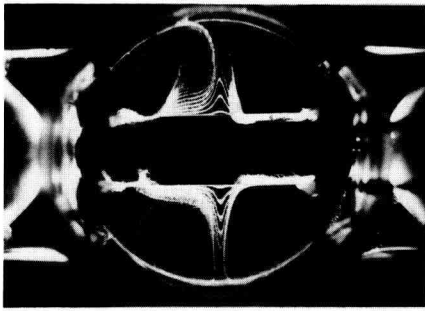
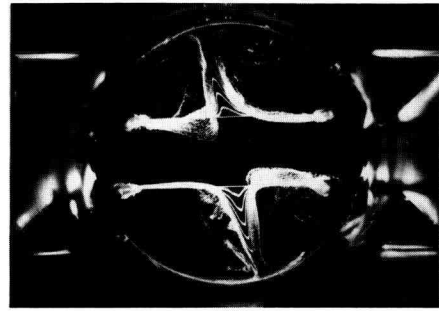
(a) $Re=230, T=0.6\text{ s}$ (b) $Re=297, T=0.3\text{ s}$ (c) $Re=395, T=0.1\text{ s}$ (d) $Re=498, T=0.5\text{ s}$ (e) $Re=600, T=0.01\text{ s}$ (f) $Re=737, T=0.2\text{ s}$ (g) $Re=850, T=0.01\text{ s}$ (h) $Re=900, T=0.2\text{ s}$

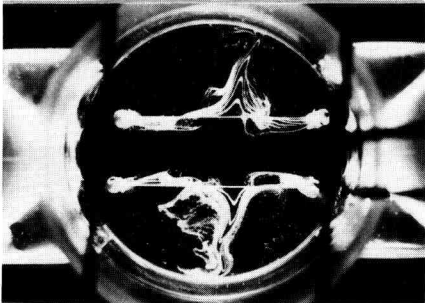
Fig. 12. Photographs of coaxial impingement of opposing jets in circular type chamber.



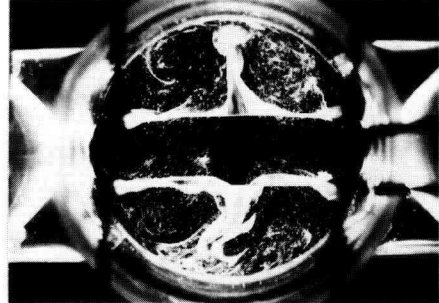
(a) $Re=311, T=0.4$ s



(b) $Re=415, T=0.2$ s

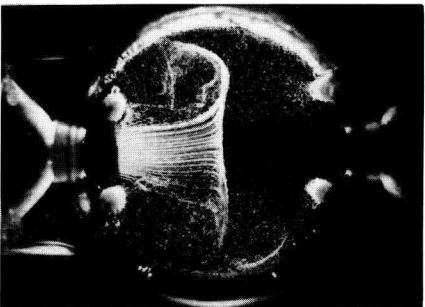


(c) $Re=606, T=0.2$ s

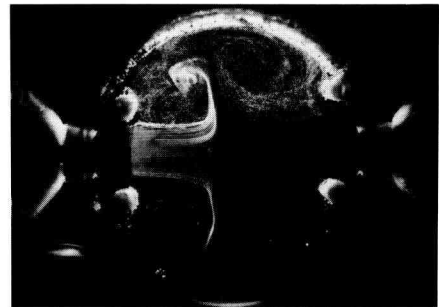


(d) $Re=1108, T=0.01$ s

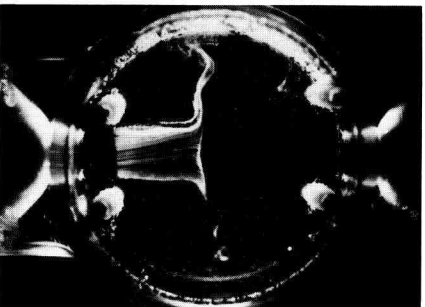
Fig. 13. Photographs of flow downstream of impinging surface.



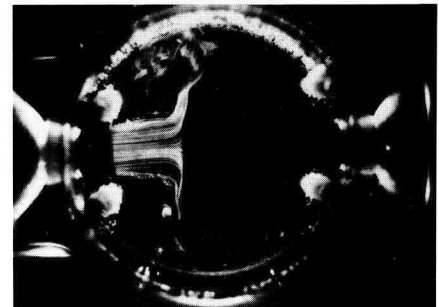
(a) $Re=273$



(b) $Re=483$



(c) $Re=717$



(d) $Re=1088$

Fig. 14. Photographs of impinging surface ($T=0.01$ s).

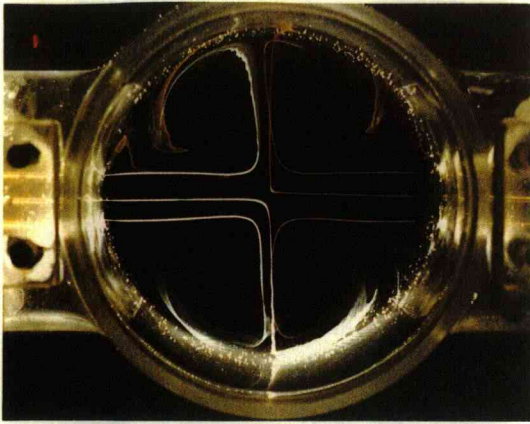
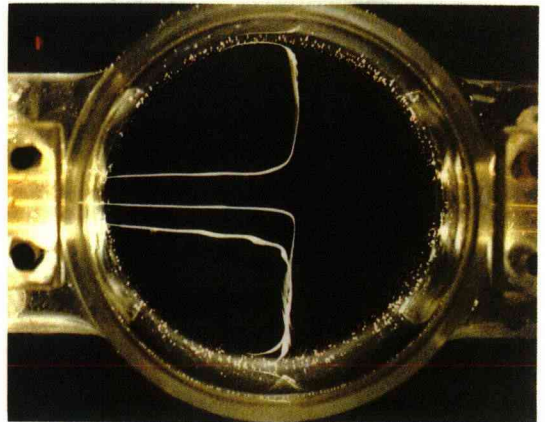
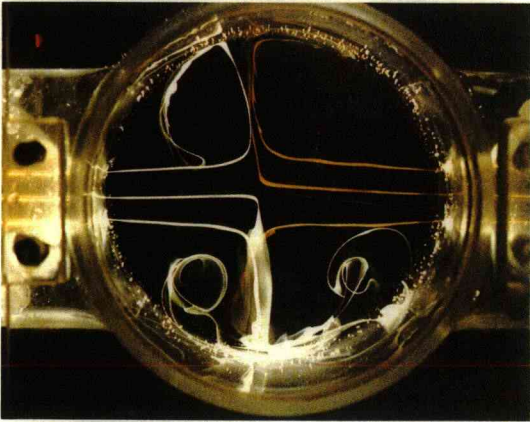
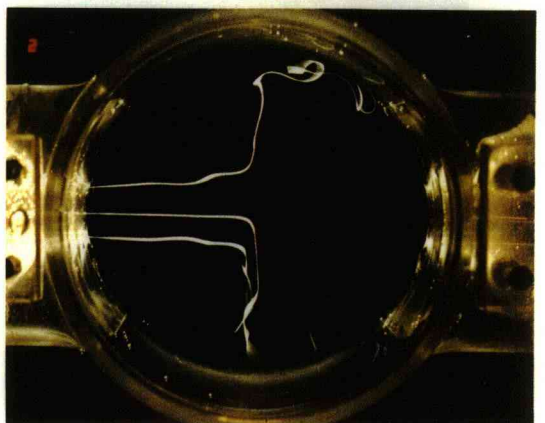
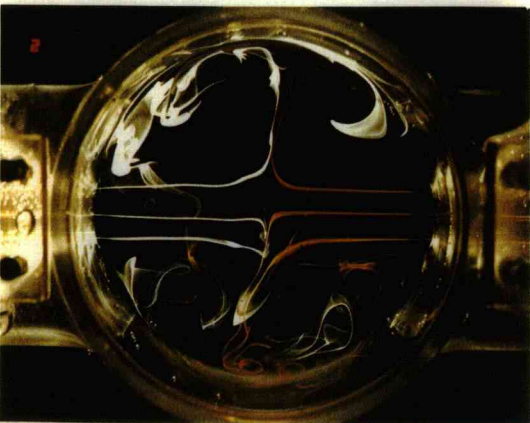
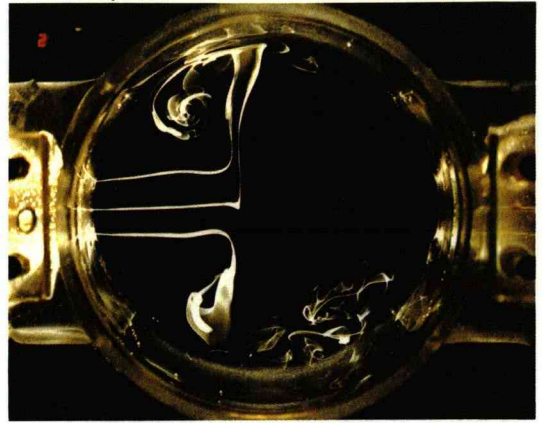
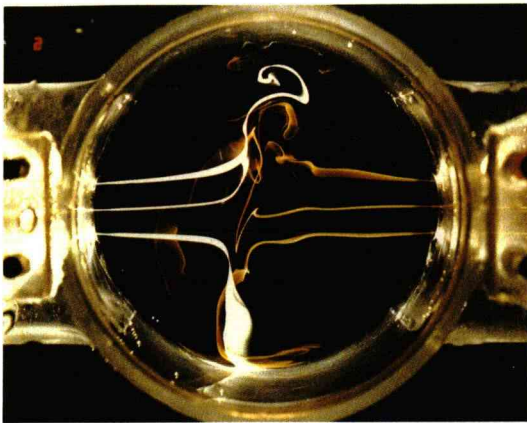
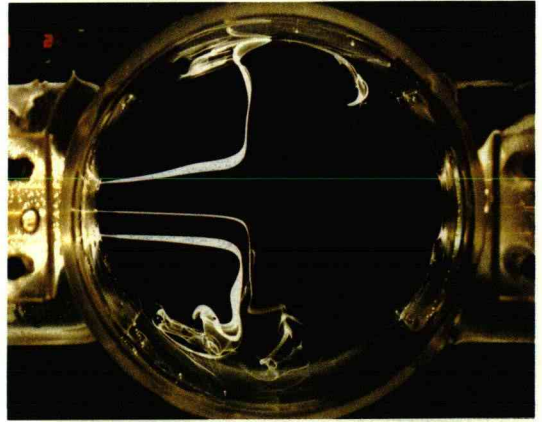
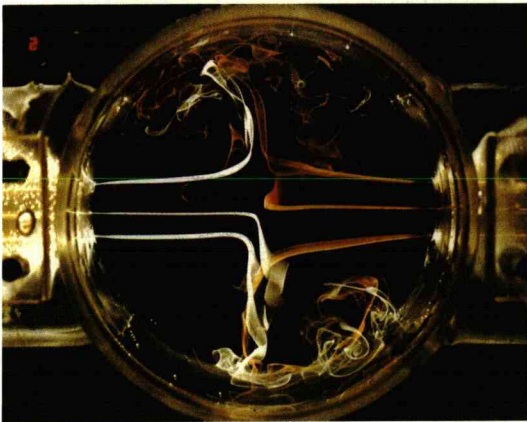
(a) $Re=132$ (b) $Re=289$ (c) $Re=424$

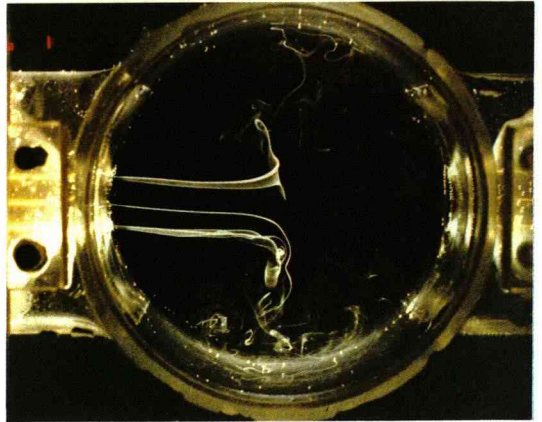
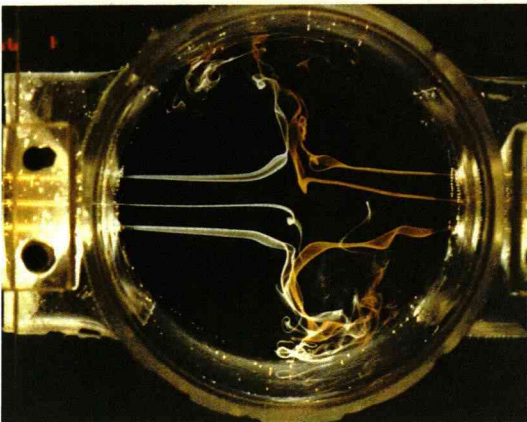
Fig. 15. Photographs of impingement by color tracers.



(d) $Re=663$



(e) $Re=918$



(f) $Re=1110$

Fig. 15. Photographs of impingement by color tracers.

突後に混合することなく混合室壁面に達しているのがわかる。このような小さい Re では衝突による混合はほとんど期待できない。

図(b)は $Re=289$ で、実際に稼働している噴流の最低レイノルズ数 ($Re \approx 300$) に近いものである。衝突面での流れの混合はあまり期待できないが、壁面に流れが達した後に流れがうず巻くのが可視化されており、二つの噴流がそこで多少混合するであろう。ただし、実動の原液は粘度が水より 1,000 倍程度大きいので、噴流流速が粘度の差だけ高いため混合室壁面の存在による原液の混合が十分行われているものと考えられる。

図(c)は $Re=424$ であり、衝突直後に小さなうずが生じており二つの噴流の混合が十分行われている。図(d)~(f)の Re の大きいものでは、さらに流れの混合が顕著になっていくのがこれらの写真からよくわかる。

4. あとがき

本報告では、各種噴流の流れの可視化実験の結果を示した。本研究は対向衝突噴流による効率のよい混合室の開発を目的とした研究の一環として行われたもので、流れの可視化実験だけではまだ十分な結果は得られていない。ただし、ある程度、対向衝突噴流の混合効果を明らかにすることができたので、今後さらに定量的な研究を進める予定である。

最後に、本研究を進めるにあたってご援助いただいたトーヨーソフラン株式会社および実験にご協力いた

だいた多くの卒研生に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 赤池・根本：混合室内の対向衝突噴流について、幾徳工大研究報告 B, 第 8 号 (昭 58), 73 頁.
- 2) 赤池, ほか 2 名：層流噴流のポテンシャルコアについて、流れの可視化, Vol. 3, No. 10 (1983), p. 143.
- 3) S. Akaike and M. Nemoto: Potential Core of Submerged Laminar Jet, International Symposium on Jets and Cavities, Miami Beach, (1985-11).
- 4) 山本, ほか 2 名：同軸対向衝突噴流の定常特性, 油圧と空気圧, 第 6 巻, 第 4 号 (昭 50-7), 8 頁.
- 5) Charles L., ほか 2 名：Mixing for Reaction Injection Molding I., Polymer Eng. and Sci., Vol. 20, No. 13 (1980), p. 875.
- 6) Charles L., ほか 2 名：Mixing for Reaction Injection Molding II., Polymer Eng. and Sci., Vol. 20, No. 13 (1980), p. 887.
- 7) 八田・野崎：円形ノズルから流出する噴流, 日本機械学会論文集, 第 40 巻, 第 336 号 (昭 49-8), 2190 頁.
- 8) Rankin G.W., ほか 3 名：An Experimental Investigation of Laminar Axisymmetric Submerged Jets, J. Fluid Mech., Vol. 133, (1983), p. 217.
- 9) Schlichting, H., Boundary Layer Theory, 7th ed., McGraw-Hill (1979), p. 230.