二次流れのカオス化を利用したマイクロミキサの実験的研究 (混合に及ぼす流路の回転効果)

Experimental Study of the Micromixer Using the Chaos of Secondary Flow (Rotation Effect of Channel on the Mixing)

学 安田 直幸 (米子高専専攻科), 正 早水 庸隆 (米子高専), 学 西田 五徳 (岡山大院),
正 森田 慎一 (米子高専), 正 大塚 茂, 正 柳瀬 眞一郎 (岡山大工), 正 山本 恭二
Naoyuki YASUDA, Yonago National College of Technology Advanced Course, 4448 Hikona-cho, Yonago-shi, Tottori 683-8502, Japan
Yasutaka HAYAMIZU, Yonago National College of Technology, 4448 Hikona-cho, Yonago-shi, Tottori 683-8502, Japan
Kazunori NISHIDA, Okayama University, 3-1-1 Tushimanaka, Okayama-shi, Okayama 700-8530, Japan
Shinichi MORITA, Yonago National College of Technology, 4448 Hikona-cho, Yonago-shi, Tottori 683-8502, Japan
Shigeru OHTSUKA, Yonago National College of Technology, 4448 Hikona-cho, Yonago-shi, Tottori 683-8502, Japan
Shinichiro YANASE, Okayama University, 3-1-1 Tushimanaka, Okayama-shi, Okayama 700-8530, Japan
Kyoji YAMAMOTO, Okayama University, 3-1-1 Tushimanaka, Okayama-shi, Okayama 700-8530, Japan

Key Words: Micromixer, Secondary Flow, Chaos, PIV, LIF

1. 緒言

近年, 化学やバイオなどの分野において化学分析などの化学操作を小さなチップ上に集積した μ -TAS (Micro Total Analysis Systems) と呼ばれる超小型・化学分析装置の開発が注目されている。この装置はさまざまなマイクロ流体素子やセンサなどからなり, 混合, 攪拌, 反応, 分離や抽出などの一連の操作を行う。しかし, 流路はマイクロサイズであるため, その流れは低レイノルズ数となり乱流による攪拌や熱移動が期待できない。そのため, 低レイノルズ数流れにおいて効率よく混合・攪拌されるマイクロ流体デバイスが必要とされている。そこで, 本研究では流路壁の一部が回転する曲がり流路により二次流れをカオス化させ, 混合・攪拌の促進を図るマイクロミキサの開発を目的とする。

本報告では, 曲がり流路断面のアスペクト比の違いによる2液の混合に及ぼす影響について二次流れの PIV 及び LIF 計測結果から検討する。

2. 記号及び関連する実験式

本実験は, これまでに研究していた曲がり流路断面が正方形断面となる Mixer I に加え, 曲がり流路断面がそれぞれ横長となる Mixer II と縦長になる Mixer III を用いて, 曲がり流路断面のアスペクト比の変更による2液の混合に及ぼす影響を調べる。実験で使用した実験装置の各寸法を表 1 に示す。2a は流路幅[mm], 2b は流路高さ[mm], R は流路の曲率半径[mm], $\delta = a/R$ は流路の無次元曲率, $\gamma = b/a$ は流路断面のアスペクト比, l は流路全長[mm]である。

Table 1 Dimensions of curved channel

	2a [mm]	2b [mm]	R [mm]	δ	γ	l [mm]
Mixer I	3	3	15	0.1	1	58.9
Mixer II	4.5	2	22.5	0.1	0.44	88.4
Mixer III	2	4.5	10	0.1	2.25	39.3

実験では, 流路を流れる流量 Q [mm³/s], ロータの角速度 Ω [rad/s] から, それぞれレイノルズ数 $Re = qd_h\nu$, テイラー数⁽¹⁾ $Tr = 2(2\delta)^{1/2}\Omega a^2/(\delta\nu)$ の無次元数を求めた。ここで, q は流路内平均流速[mm/s], $d_h = 4ab/(a+b)$ は水力直径[mm], ν は作動流体の動粘度[mm²/s]である。 Tr は作動流体が流れる方向と同方向にロータを回転させる場合を正としている。また, 曲がり流路において δ の違いによる流量の違いを考慮するた

めに曲がり流路層流パラメータであるディーン数⁽²⁾ $De = Re\delta^{1/2}$ を用いた。

3. 実験方法

実験の手順としては, まず, 図 1 のタンク①, ②にそれぞれ試料である作動流体(グリセリン水溶液 70wt%とグリセリン水溶液 70wt%にレーザ蛍光染料であるローダミン B を濃度 2.5ppm で溶解したもの)を溜め, ポンプ③, ④によりオーバーフロータンク⑤, ⑥へ輸送する。2液は流路⑦で合流し, そのまま試験部である曲がり流路⑨へと流れ込みバルブ⑩で流量を調整し排水される。試験部へ2液はそれぞれ縦に2層となるように同量流入させる。流量は, 出口から流出する重量を測定し, 重量法により算出した。試験部のロータの駆動には, モータ⑧を用いた。試験部の流路はロータとケーシングで形成しており, 流路の上壁面と内壁がロータである(図 2 参照)。⑪は可視化の際に光の屈折を緩和し二次流れを見やすくするための水で満たしたビューイングブロックである。PIV 及び LIF 計測には Davis7.2 (LaVision 社) を使い, PIV 用のトレーサには比重 1.1 の中空ガラス粒子(粒子径 9~13 μ m)を用いた。

可視化方法は図 2 のように, 流路側面を波長 532nm の CW レーザシート (LaVision 社: CW-532-3W) で照らし, 流路断面をハイスピードカメラ (LaVision 社: HSS4G) で撮影した。撮影位置は図 2 のように曲がり流路入口から 180°の位置で行った。PIV を行う場合は, バンドパスフィルタ (中心波長 532nm, 半値全幅 10nm) をつけガラス粒子のみの像を取得し速度分布を算出した。LIF を行う場合は, ハイパスフィルタ (透過波長 570nm 以上) をつけローダミン B の蛍光のみを取得し濃度分布を算出した。

Fig.1 Experimental setup

Fig.2 Method of visualization

4. 実験結果

4.1 二次流れ

図3にMixer I, Mixer II, Mixer IIIにおける $Tr = 3, De = 0.3$ の LIF, PIV 結果をそれぞれ示す。それぞれ(i)が LIF, (ii)が PIV の結果であり、画像の右と上側がロータ壁面、左と下側がケーシング壁面である。また、ローダミン B で染色されたグリセリン水溶液が二次流れ断面において右側に来るように撮影した。LIF 計測結果の右横にはそれぞれローダミン B で染色されたグリセリン水溶液の濃度を示しており、濃度 50% 付近の領域が増加することにより、混合が促進されると評価する。

Fig.3 Secondary flow pattern at $Tr = 3$ and $De = 0.3$

曲がり流路の断面が正方形断面となる Mixer I の LIF 結果を見ると、ロータの回転の影響により 2 液は層を形成せず複雑化している。PIV 結果を見ても二次流れは複雑化し、時間発展に対しカオス的な変化をする。さらに De が小さくなるとロータの回転の影響は強まり、Mixer I においては $De \leq 0.1Tr$ という関係において混合が促進されることが分かった。また、Mixer I と Mixer II の LIF 結果を比較すると、同じ De, Tr にも関わらず Mixer II においては Mixer I のように混合促進されていない。PIV 結果を見ても Mixer I に比べて弱い二次流れとなっている。次に Mixer I と Mixer III の LIF 結果を比較すると、Mixer III は同じ De と Tr の関係で混合が促進され、二次流れの構造も複雑である。PIV 結果では、Mixer I でも見られるケーシング壁面（左側）からロータ壁面（右側）への流れが Mixer III ではより発達しており、広い範囲で発生している。

4.2 軸流速度

本実験ではさらに撮影角度を変更し、曲がり流路における軸流速度の PIV 計測を行なった。その PIV 計測結果をもとに作成した軸流速度分布を図4に示す。グラフの縦軸は時間平均軸流速度 w [m/s]、横軸は流路幅 x [mm] (図3の横軸) で

あり、各プロットは撮影位置 (図3の縦軸) を示している。また、図4(a)は曲がり流路入口より 180° 、図4(b)は曲がり流路入口より 0° の位置において計測したものである。

各グラフよりすべての装置において、ロータ壁面に近づくにつれ流速は増加し、ケーシング壁面に近づくにつれ流速は減少する傾向が表れている。しかし、混合が促進されている Mixer I, Mixer III においては、ロータの回転が正回転にも関わらず逆流が発生していることが確認できる。これは、ロータの回転の影響が強まることで、曲がり流路出口付近で圧力が上昇し、流れとは逆向きの圧力勾配の発生によるものと考えられる。 180° の位置である図3(a), (c)の二次流れの PIV 結果と比較すると、図4(a)の逆流が発生している位置において、ケーシング壁面からロータ壁面へ向かう (曲がりの内側へ向かう) 二次流れが発生しており、この二次流れは逆流の影響で発生すると思われる、流路断面のアスペクト比が大きくなるにつれ逆流の領域は増加している。図4(b)を見ると、 180° で見られたような逆流が、 0° の位置まで到達しており、曲がり流路全体で逆流が発生していることが分かる。特に Mixer III での逆流は広範囲であり、曲がり流路内で積極的な循環が起きていると考えられる。この逆流により曲がり流路内において発生した循環流の影響で二次流れはカオス化され、循環流の影響が強いほど混合が促進されると考えられる。

Fig.4 Axial velocity distribution at $Tr = 3$ and $De = 0.3$

5. 結論

曲がり流路断面のアスペクト比が異なるマイクロミキサの可視化計測を行なった結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) アスペクト比 $\gamma = 1$ の Mixer I と $\gamma = 2.25$ の Mixer III においては、 $De \leq 0.1Tr$ という関係で混合は促進される。
- (2) アスペクト比 γ が大きい方が混合はより促進される傾向にある。
- (3) 逆流により発生する循環流の影響が二次流れのカオス化に関係していると考えられる。

引用文献

- (1) Yamamoto, K., Wu, X., Nozaki, K. and Hayamizu, Y., "Visualization of Taylor-Dean flow in a curved duct of square cross-section" Fluid Dynamics Research, Vol.38(2006), PP.1-18.
- (2) 日本機械学会編, 技術資料管路・ダクトの流体抵抗, (1979), pp.68-71, 日本機械学会.