S055013

テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサ
(流路の回転効果)田原功一郎^{*1}, 早水庸隆^{*2}, 川邊俊彦^{*3}, 柳瀬眞一郎^{*4},
森田慎一^{*2}, 大塚 茂^{*2}, 山本恭二^{*4}A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow
(Rotation Effect of the Channel)Kouichiro TABARA^{*1}, Yasutaka HAYAMIZU^{*2}, Toshihiko KAWABE^{*3}, Shinichiro YANASE^{*4},
Shinichi MORITA^{*2}, Shigeru OHTSUKA^{*2}, Kyoji YAMAMOTO^{*4}^{*1} Yonago National College of Technology Advanced Course, 4448 Hikona-cho, Yonago-shi, Tottori 683-8502, Japan^{*2} Yonago National College of Technology, 4448 Hikona-cho, Yonago-shi, Tottori 683-8502, Japan^{*3} Tsurumi Manufacturing CO., LTD., 2700 Yomi-cho, Yonago-shi, Tottori 683-0851, Japan^{*4} Okayama University, 3-1-1 Tsushimanaka, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama 700-8530, Japan

The micromixer, which has a rotor with a curved channel, is studied experimentally. The Taylor-Dean flow in a curved channel of rectangular cross-section is investigated using PIV (Particle Image Velocimetry) and LIF (Laser Induced Fluorescence) methods. Two walls of the channel (the inner and top walls) rotate around the center of curvature and a pressure gradient is imposed in the direction of the exit of the channel. The non-dimensional channel curvature $\delta = a/R$ is taken to be about 0.1, where $2a$ is the width of the channel, R the curvature radius of the channel. Other non-dimensional parameters concerned are the Dean number $De = Re\delta^{1/2}$, where $Re = qd_h/\nu$ is the Reynolds number, q the mean flow velocity in the channel axis direction, d_h the hydraulic diameter of the channel, ν the kinematic viscosity, and the Taylor number $Tr = 2\alpha^2\Omega(2\delta)^{1/2}/(\delta\nu)$, where Ω is the angular velocity of the rotor. Photographs of the flow in a cross-section at 180° downstream from the curved channel entrance are taken by changing the flux (De) at a constant rotational speed (Tr) of the channel walls. It is found that good mixing performance is obtained in the case of $De \leq 0.1|Tr|$. This tendency appears more strongly if aspect ratio is large. And then we have confirmed the occurrence of reversal of the mean axial flow.

Key Words : Micromixer, Taylor-Dean Flow, PIV, LIF

1. 緒 言

近年、化学やバイオなどの分野において 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、曲がり管内流であるディーン流れと同軸回転二重円筒内流であるテイラー流れを組み合わせたテイラー・ディーン流れ⁽¹⁾を利用し、二次流れを複雑化させ、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。これまでの研究により二次流れの複雑化の影響で、

^{*1} 学生員, 米子工業高等専門学校専攻科 (〒683-8502 鳥取県米子市彦名町 4448)^{*2} 正員, 米子工業高等専門学校 (〒683-8502 鳥取県米子市彦名町 4448)^{*3} 正員, 株式会社鶴見製作所 (〒683-8501 鳥取県米子市夜見町 2700)^{*4} 正員, 岡山大学 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3 丁目 1 番 1 号)

E-mail: hayamizu@yonago-k.ac.jp

低レイノルズ数流れにおいても混合が促進されることが明らかにされている⁽²⁾。

そこで本講演では、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について、テイラー・ディーン流れの PIV (Particle Image Velocimetry) 及び LIF (Laser Induced Fluorescence) 計測から検討した結果について報告する。

2. 記号及び関連する実験式

本研究で使用した実験装置の寸法を表 1 に示す。 $2a$ [mm] は流路幅、 $2b$ [mm] は流路高さ、 R [mm] は流路の曲率半径、 $\delta=a/R$ 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 [mm] は流路全長である。

Table1 Dimensions of curved channel

Mixer	$2a$ [mm]	$2b$ [mm]	R [mm]	δ	γ	l [mm]
I	3	3	15	0.1	1	58.9
II	4.5	2	22.5	0.1	0.44	88.4
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]、ロータ角速度 Ω [rad/s] から、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する。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⁽³⁾ $De = Re\delta^{1/2}$ を用いた。

3. 実験方法

3・1 実験装置概略

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。各装置は、表 1 よりミリスケールであるが、レイノルズの相似則より動粘度の大きな流体を使用することで微小流路内の流れを再現する。

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。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壁面とケーシング壁面で形成しており、流路の上壁面と内壁がロータ（移動）壁面である（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 解析には 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。

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

Fig.2 Schematic diagram of the method of visualization

3・2 可視化方法

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。

4. 実験結果

図3, 4, 5 にそれぞれ Mixer I, Mixer II, Mixer III の実験結果を示す。各図の縦軸, 横軸は無次元座標であり, それぞれ x 座標, y 座標を流路幅の半分の a [mm] で無次元化したものである。また, それぞれ (a) が LIF 結果, (b) が無次元時間平均軸流速度の等値線図, (c) が無次元時間平均二次流れ速度のベクトル線図, (d) が (c) の RMS (Root Mean Square) 値の等値線図である。各図の右端と上端がロータ壁面, 左端と下端がケーシング壁面である。また, 写真は上流側から見た時のもので, 2 液は左右でロータ側にローダミン B を溶解したグリセリン水溶液が来るよう 2 液を同量で 2 層となるよう流した。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, 混合が促進されていると評価する。

図3の Mixer I の結果について見てみると, (a) の LIF 結果より広い範囲で良好な混合が得られていることが分かる。他の De と Tr でも実験した結果, 良好な混合が得られる条件は, $De \leq 0.1Tr$ の関係であることが分かった。次に (b) の軸流速度より, 混合がなされている部分には逆流が発生していることが分かる。この逆流が発生する原因としては, ロータの回転によって出口付近の圧力が上昇し, 逆圧力勾配が発生することによるものだと考えられる。また, ロータ壁面である上端, 右端付近はロータの回転の影響が支配的であるため, 逆流が発生していない。次に (c) の二次流れを見てみると, ロータ壁面付近はロータからケーシングへと向かう流れが確認できるが, それとは逆のケーシングからロータへと向かう流れも確認できる。このケーシングからロータへと向かう流れは, (b) の結果より逆流が発生したときに発生する二次流れであると考えられる。また (d) の RMS 値を見ると, 逆流が発生している部分の値は低くなっていることが確認できる。

Fig.3 Flow pattern of Mixer I at $Tr=3$ and $De=0.3$

次に図4のMixerⅡの結果について見てみると、(a)のLIFよりMixerⅠに比べて良好な混合が得られていないことが分かる。次に(b)の軸流速度より、逆流が発生していないことも分かる。このことは(c)の二次流れを見ても逆流による二次流れが無いことから明らかである。逆流が発生していない原因としては、ロータ壁面の上壁からの距離が近いために、ロータの回転の影響が広範囲で支配的になり逆流が発生しなかったと考えられる。また(d)のRMSは、逆流に関係なく、MixerⅠと同じような結果になっている。

Fig.4 Flow pattern of MixerⅡ at $T=3$ and $De=0.3$

Fig.5 Flow pattern of MixerⅢ at $T=3$ and $De=0.3$

最後に図 5 の MixerⅢの結果について見てみると、(a) の LIF より、3 つの Mixer のうち最も良好な混合を得られていることが分かる。このことより、アスペクト比が大きくなると混合が促進されることが考えられる。次に (b) の軸流速度より、逆流が広い範囲で発生していることが分かる。このことは (c) の二次流れを見ても同様に確認できる。また (d) の RMS より、他の 2 つの Mixer よりも数値が大きいことが確認できる。以上の結果から、最も良好な混合を得られた原因としては逆流が広範囲で発生したために、二次流れが複雑化され、混合が促進されたのではないかと考えられる。

5. 結 語

テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサにおいて以下のことが明らかとなった。

- (1) $De \leq 0.17r$ の関係で混合は促進される。
- (2) アスペクト比が大きい方がより混合が促進される。
- (3) 逆流が大きくなると、二次流れが複雑化され、混合が促進される。

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) Hayamizu.Y, Yanase.S, Morita.S, Ohtsuka.S, Nishida.K, Gonda.T and Yamamoto.K, “A Micromixer Using the Chaos of Secondary Flow: Rotation Effect of Channel on the Chaos of Secondary Flow”, *Open Journal of Fluid Dynamics*, Vol.2, No.4A(2012), PP.195-201.
- (3) 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.