粘弾性流体により掃引されるマイクロキャビティ内の慣性弾性不安定

鈴木 洋^{*1}, 日出間 るり^{*2}, 菰田 悦之^{*3}

Inertio-elastic flow instability in a micro-cavity swept by a visco-elastic fluid

Hiroshi SUZUKI^{*1}, Ruri HIDE^{*2} and Yoshiyuki KOMODA^{*3}^{*1, *3} Department of Chemical Science and Engineering, Kobe University
1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe 657-8501, Japan^{*2} Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University
1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe 657-8501, Japan

Received 18 November 2014

Abstract

Inertio-elastic instability characteristics of visco-elastic fluids sweeping a micro-cavity mounted in a micro-duct have been investigated in order to develop a effective micro mixer. The cavity depth, the cavity length and the width of the wider flow path were fixed at 200, 1,000 and 400 μm , respectively while the solvent Reynolds number was changed from 0.100 to 100. As a visco-elastic fluid, a cationic surfactant/counter-ion system was applied. The molar ratio of counter-ion to surfactant was changed from 1.5 to 10 in order to control rheological characteristics of the fluid. Flow visualization experiments were performed with a high-speed camera mounted on a microscope. From the results, it was that a tonguing motion of the separation fluid bubble tip formed in the downstream region in the cavity occurs at a certain Weissenberg number larger than 200 due to the inertio-elastic instability. The fluctuating bulge structure was also observed on the upstream side wall of the cavity in a higher range of the Weissenberg number. These characteristics were considered to be effective for a mixing process. It was also found that the separation bubble size is determined with Weissenberg number for all fluids treated in this study, but the previous correlation suggested for a macro-scale system does not agree with the present results. This indicated that some different relaxation structure exists in a micro-scale system.

Key words : Visco-elastic fluid, Micro-cavity, Inertio-elastic instability, Micro-mixing, Surfactant solution, Visualization

1. 緒 言

化学プロセスにおいてマイクロ流路のような微小な反応器を用いることが注目されており、マイクロリアクター (Mae, 2007, Mills, et al., 2007, Pohar and Plazl, 2009, Sallic, et al., 2012) と呼ばれている。マイクロリアクターを用いるメリットにはいくつかあるが、例えば粒子状物質を作成する場合、粒子径が一樣になることが報告されている (Lin, et al., 2004, Suzuki, et al., 2008, Breslauer, et al., 2010, Luty-Blocho, et al., 2013)。一方で、マイクロ流路内は層流であるため、流体の混合が拡散のみによって行われるため、反応速度が低下する問題が生じている。

このことに関連して、いくつかのマイクロリアクター用の混合技術が提案されている。大別して流体に外部から仕事を与え、動的に混合を行うアクティブ混合と、混合流路を複雑化したり流体の有する非定常性を強化して静的に混合を促進するパッシブ混合に分かれる (Hessel, et al., 2005)。アクティブ混合に関しては、MEMS を利用した機械的マイクロ攪拌が提案されている (Park, et al., 2008) が、ゲルの熱膨張を利用して、分岐流路に振動を与える

方法もある(Stoeber, et al., 2007). しかしながら主流はパッシブ混合であり, T 型混合路 (Bothe, et al., 2006) や, カオス混合(Mouza, et al., 2008)などの研究があり, マイクロミキサーの比較検討 (Falk and Commenge, 2010, Kashid, et al., 2011) についてもなされている. また Hessel らはアクティブおよびパッシブな混合法について総括している. しかしながら, 従来のマイクロミキサーの流路構造が非常に複雑であり, コストや製造方法において不利であった. また混合によって固体粒子状の物質を生成させる場合, 狭流路内で閉塞が生ずる場合があり, 適応範囲が限られている. そこで本研究では粘弾性流体が示す慣性弾性不安定性を利用する混合について検討する.

マイクロ流路においては, レイノルズ数は非常に低いが, 流体の弾性に関連するワイセンベルグ数は非常に高い値を示す. このことにより, 比較的単純な形状のマイクロ流路内においても慣性弾性不安定性が顕著に表れる (Larson, 1992). Gulati ら (Gulati, et al., 2008)は 90° マイクロベンド内の弾性不安定性 2 次流を利用したマイクロ混合を提案した. また Rodd ら (Rodd, et al., 2005)は急拡大・急縮小部を有するマイクロ流路における慣性弾性不安定性に関して, 狭流路基準のワイセンベルグ数が 100 程度において慣性弾性不安定性を示すことを明らかにした. 同様の流路で, Hidema ら (Hidema, et al., 2014)は慣性弾性不安定性の臨界値からヒアルロン酸ナトリウムの濃度決定を行う方法を示した.

Rodd らの用いた流路では狭流路幅が $25\ \mu\text{m}$ と非常に狭いものであったが, 本研究では固体粒子生成等に供するよう比較的広い流路幅を有するマイクロダクト片側にキャビティを設けた単純な形状における慣性弾性不安定性によるマイクロリアクター内の混合特性改善を目的とした実験を行う. キャビティ内では流速が低減するので, 拡大比を適切に選定することによって, 滞留時間を稼ぐことが可能となる. 筆者ら (Suzuki, et al., 2014)はキャビティ深さ $20\ \text{mm}$ のマクロ流動に関して検討し, キャビティ内の下流剥離泡上流端が揺動するタンギング運動や, キャビティ内に浸入した流体が一旦キャビティ底面近傍で上流に逆流するバルジ構造の存在を明らかにした. これらは慣性弾性不安定性によって生ずる流れであり, マイクロキャビティ内においても, このような慣性弾性由来の不安定な流れが生ずれば, 高効率なマイクロ混合特性が期待されと考えられる.

本研究では比較的広い単純な形状流路で生ずる慣性弾性不安定性を利用したマイクロ混合法の開発を目指した基礎研究として, 狭流路幅を $200\ \mu\text{m}$, キャビティ深さを $200\ \mu\text{m}$ およびキャビティ長さを $1,000\ \mu\text{m}$ と固定して, 溶液の粘弾性特性を変化させた場合の不安定性流動特性について検討した.

Fig. 1 Apparent shear viscosity of each solution (Suzuki, et al., 2012b).

The solution has shear-thinning tendency when the counter-ion ratio, ξ [-], is low.

Fig. 2 The first normal stress of each solution (Suzuki, et al., 2012b).

The first normal stress decreases with the counter-ion ratio.

2. 実験方法

2・1 試料

粘弾性流体にはイオン交換水にカチオン系界面活性剤である塩化オレイルビスヒドロキシエチルメチルアンモニウム ($\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2\text{CH}_3\text{Cl}$; 商品名 Ethoquad O/12) を $2,000\ \text{ppm}$ と対イオン供給剤としてサリチル酸ナトリウム

を添加したものをを用いた。サリチル酸ナトリウムの界面活性剤に対するモル比 ξ [-]を 1.5, 3, 5 および 10 の 4 段階に変化させた。このことにより溶液の粘弾性特性を変化させる(Suzuki, et al., 2012a)。溶液は十分に溶解させるため、使用する前に少なくとも 24 時間以上常温下においた。

図 1 および 2 に前報(Suzuki, et al., 2012b)で報告したそれぞれの試料の見かけせん断粘度 η [Pa·s]および第一種法線応力差 N_1 [Pa]を示す。また図 3 に緩和時間 t_i [s]を示す(Suzuki, et al., 2012b)。見かけせん断粘度は、 $\xi = 1.5$ の場合に高いゼロせん断粘度 η_0 [Pa·s]を示し、その後せん断速度 $\dot{\gamma}$ [s⁻¹]が上昇するにしたがって粘度が低下するシアニング現象を示す。本研究の範囲では ξ が上昇するにしたがって、ゼロせん断粘度 η_0 [Pa·s]が低下し、 $\xi = 10$ の場合にはほぼ水と同程度の粘度を示す。また第一種法線応力差は、 $\xi = 1.5$ の場合には $\dot{\gamma} > 10$ の領域で非常に高い値を示しており、弾性が大きな流体であることがわかる。一方で ξ が大きくなると $\dot{\gamma} > 100$ の領域で大きくなるが、低せん断域では明確な第一種法線応力差を示さない。本試料の緩和挙動は複雑であり、前報(Suzuki, et al., 2012b)ではせん断印加を急停止させた際のせん断応力 τ [Pa]の緩和挙動を以下の式のように 3 つの緩和挙動の和であるとした。

$$\tau = \tau_1 e^{-t/t_{r1}} + \tau_2 e^{-t/t_{r2}} + \tau_3 e^{-t/t_{r3}} \quad (1)$$

ここで、 t [s]は時間、 τ_1 [Pa]、 τ_2 [Pa]および τ_3 [Pa]はそれぞれ t_{r1} [s]、 t_{r2} [s]および t_{r3} [s]の緩和特性を有する構造からの寄与を表す。緩和時間が長い順に t_{r1} [s]、 t_{r2} [s]および t_{r3} [s]と定義した。図 3 にその結果を示す。長い緩和時間は本研究の範囲では ξ が大きくなるに従って消失し、 $\xi > 5$ では単一緩和時間を示す。ここではそれぞれの溶液の最も長い緩和時間 $t_{\max}$ [s]を用いて次節で示すワイセンベルグ数を定義した。

Fig. 3 Effect of the counter-ion ratio on relaxation times of each solution (Suzuki, et al., 2012b). The solution has multi-relaxation times when the counter-ion ratio is low.

2・2 試験流路

図 4 に実験に用いたマイクロ流路を示す。粘弾性流体はシリンジポンプから所定の流量（設定誤差 1%以内）で送液され、内径 2.0 mm のテフロン管を通り、テストセクションであるキャビティを有するマイクロ流路に流入する。テストセクションはポリジメチルシロキサン(PDMS)とガラス板で作成されており、マイクロ流路上流および下流には直径 2 mm、深さ 200 μ m のリザーバーを設置し、上流リザーバー下流端からキャビティ上流端まで、キャビティ下流端から下流リザーバー上流端までの距離をそれぞれ 11 mm とした。親水化処理は行っていない。流体には流れの可視化に供するためにトレーサー粒子として 2.1 μ m のポリスチレン粒子を溶液に固相体積割合 0.10 vol%で混入し、顕微鏡に設置したビデオカメラで撮影した。流動の大略を知る実験では、30fps (シャッター速度 1/8000 s)で撮影を行い、非定常性の詳細を知る実験(表 1 $\xi = 1.5$, $Re = 5.00$ の条件)では、1,000 fps (シャッター速度 1/10,000 s)で撮影した。対物レンズは共通であり、10 倍率、開口数 0.25 のものを使用した。キャビティ深さ

H [m], 長さ L [m], 広流路幅 W [m] および奥行き方向深さをそれぞれ $200\text{ }\mu\text{m}$, $1,000\text{ }\mu\text{m}$, $400\text{ }\mu\text{m}$ (誤差 0.5% 以内) および $200\text{ }\mu\text{m}$ (誤差 1% 以内) に固定した. いずれの実験においても 30 s 以上の定常待ちを行ったのち, 約 30 s の撮影を行って解析を行った. 水粘度 μ [Pa·s] 基準のレイノルズ数 Re [-], 溶液のゼロせん断粘度基準のレイノルズ数 Re_0 [-] およびワイゼンベルグ数 We [-] を以下のように定義する.

$$Re = \frac{\rho U_m H}{\mu} \quad (2)$$

$$Re_0 = \frac{\rho U_m D_H}{\eta_0} \quad (3)$$

$$We = t_{\max} \frac{U_m}{(W - H)/2} \quad (4)$$

ここで ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] は溶液の密度であり, D_H [m] は狭流路の水力相当直径 (= $200\text{ }\mu\text{m}$), U_m [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] は狭流路における断面平均速度である.

本研究では各溶液に対してレイノルズ数 Re を 0.100 から 100 まで変化させて実験を行った. その場合の Re_0 および We を表 1 にそれぞれの値をまとめて示す. なお水の場合についても同様の範囲で実験を行った.

Fig. 4 Experimental apparatus set up and test section. The solution was supplied by a syringe pump to the test section, which has a micro-cavity with the depth of $200\text{ }\mu\text{m}$ and the length of $1,000\text{ }\mu\text{m}$.

Table 1 Non-dimensional parameters. The Reynolds numbers, Re [-] and Re_0 [-], and the Weissenberg number, We [-], are defined by Eqs. (2) to (4). ξ [-] is the counter-ion ratio to the surfactants.

ξ	Re	Re_0	We
1.5	1.00×10^{-1} to 100	2.03×10^{-3} to 2.03	50.4 to 5.04×10^4
3	1.00×10^{-1} to 100	6.99×10^{-3} to 6.99	4.27 to 4.27×10^3
5	1.00×10^{-1} to 100	2.69×10^{-2} to 26.9	6.28×10^{-1} to 628
10	1.00×10^{-1} to 100	8.87×10^{-2} to 88.7	6.28×10^{-1} to 628

3. 結果および考察

3・1 流動特性

図 5 に各レイノルズ数における粘弾性流体の流動可視化実験の結果を示す．ここでは粘弾性が最も強く表れる $\xi = 1.5$ の場合の結果を示す($Re = 0.100 \sim 50.0$)．また図 5(a)には水の結果を示す($Re = 5.00$)．なお，図にはキャビティ上流の上端から剥離した流れの流線を模式的に示した．

図より，水の場合には，キャビティ上流から剥離した流れはキャビティのほぼ中央底部に再付着し，その後壁面に沿うように流れ，キャビティ下流側面を上昇して，下流に流出する．一方，粘弾性流体の場合でレイノルズ数が小さい場合($Re = 0.100$)には，キャビティ上流側面に沿うように流体がキャビティ内部に浸入し，キャビティ上流の側面近傍で再付着する．すなわちバラス効果が生ずる．その後キャビティ底面を掃引するように流動するが，キャビティ中間の位置付近で剥離し，水と比較して大きな剥離泡を形成する．この剥離泡は $Re = 5.00$ ではその上流端が揺動すなわちタンギング流動を示し，非定常性が現れる．剥離泡のサイズは $Re = 10.0$ まではレイノルズ数が大きくなるにしたがって増大するが， $Re = 20.0$ では急減する．さらに $Re = 50.0$ の場合にはキャビティ上流上端から剥離した流れが，上流側面方向に一旦逆流するバルジ構造が現れ，その大きさは非定常に変動し，再付着位置の非定常性が現れる．

Fig. 5 Photos of flows in the micro-cavity. The counter-ion ratio was set at 1.5 in (b) though (f). The solid arrow indicates the schematic flow line separated from the upstream top corner of the cavity.

図 6 にタンギング流動の非定常変化を示す． $\xi = 1.5$ の $Re = 5.00$ の場合である．また図には剥離泡の境界の形の変化を模式的に示した．

剥離泡はその中央部近傍が凹み($t = 0.1$ s)，それによって上流側先端が上流に突出する($t = 0.2$ s)．その後ふたたび中央部が膨らみ($t = 0.3$ s および 0.4 s)，剥離泡の上流側先端が丸みを帯びつつ収縮する($t = 0.5$ s)．このような剥離泡の不安定性は上流側流動の不安定性と関連するものと思われる．一方で図 7 に示した剥離泡長さ x_s [m]の時間変化から，その変動には必ずしも周期性はないことがわかる．また図 6 の結果と併せて考慮すると，最小緩和時間より長く，第 2 緩和時間よりは短い時間スケールで変化している様子がわかる．しかしながら，高速度撮影が 5 s 程度までと限られているため，最長緩和時間の時間スケールについては十分には検証できない．今後，レイノルズ数の影響を含めて，不安定性の時間スケールについてはより詳細な検討が必要であると思われる．

3・2 剥離泡サイズおよび再付着点長さ

図 8 および 9 にそれぞれ再付着点長さ x_r [m]および剥離泡長さ x_s をキャビティ深さ H で規格化して示す．図のエラーバーは各長さの変動幅を示している．また実線で水の場合の結果を示す．また図 8 には Armaly ら(Armaly, et al., 1983)によって後ろ向きステップ下流で観察された Newton 流体の再付着位置を示す．

図 8 より, 水の場合の再付着長さはレイノルズ数が上昇するにしたがって増加し, 高レイノルズ数域で測定された Armaly らの結果と一致することがわかる. 一方粘弾性が強く表れる $\xi = 1.5$ の場合には再付着長さはバラス効果によって非常に小さい値を示し, バルジ構造が現れる $Re > 50$ 以上でやや増加する. $\xi = 10$ の場合には水と同様の再付着長さを示すが, $\xi = 5$ の場合には $Re = 5$ までは水の曲線上にあるが, その後急激に減少し, ξ がより小さい場合と同様の値を示す. なお, バルジ構造は $\xi = 3$ の場合の $Re = 100$ で見られたが, $\xi = 1.5$ 以外のその他の場合には観察されなかった.

Fig. 6 Time-variation of tonguing motion of the separation bubble ($\xi = 1.5$, $Re = 5.00$). The solid arrows indicate the schematic separation boundary. The tonguing motion occurs relatively slowly.

Fig. 7 Time-variation of the separation bubble size ($\xi = 1.5$). The bubble size fluctuates irregularly and the irregularity does not depend on the Reynolds number.

図 9 より, 水の剥離泡長さはレイノルズ数が上昇するにしたがって, 減少することがわかる. 一方で粘弾性流体の場合にはあるレイノルズ数において水の値より大きな値を示す. この水の剥離泡長さから乖離して剥離泡長さが上昇するレイノルズ数は ξ が大きくなるに従って (すなわち粘弾性が弱くなるに従って) 上昇する. また一旦増加した剥離泡長さはあるレイノルズ数でピーク値を示し, その後低下する傾向がある. このピーク値を示すレ

レイノルズ数の値についても ξ が大きくなるに従って上昇する。また $\xi = 1.5$ の場合には $Re = 1$ 付近から剥離泡長さの揺動（タンギング流動）が開始されるが、タンギング流動が生ずるレイノルズ数もまた ξ が増加するに従って上昇する。これらの現象はワイセンベルグ数の上昇に関連すると考えられる。

Fig 8 Reattachment points on Reynolds number.

The results in water case agree with that by Armaly et al. (1983). When ξ is low, the reattachment length is small due to Burus effect, but it fluctuates in higher Reynolds number because of the bulge structure appearance.

Fig 9 Separation bubble lengths on Reynolds number.

The separation bubble length is large when ξ is low and fluctuates due to the tonguing motion of the separation bubbles.

Fig 10 Separation bubble length on Weissenberg number.

The solid line indicates the results obtained by McKinley et al. (1991) for a coaxial contraction flow. Separation bubble sizes are well correlated by Weissenberg number, but the correlation by McKinley et al. does not work on the present results.

Fig 11 Separation bubble length on Eq. (5).

The solid line indicates the results obtained by Suzuki (2010) for a macro-scale similar flow. Separation bubble sizes are also well correlated by Eq. (5), but the correlation by Suzuki neither works on the present results.

図 10 に剥離泡長さをワイセンベルグ数で整理して示す。図中実線は McKinley ら(McKinley, et al., 1991)が同軸円筒縮小流に対して調べた、粘弾性流体の結果である。McKinley らの整理にあわせて剥離泡長さを広流路幅の 2 倍で整理した。図より、剥離泡長さは、それぞれの溶液の最大緩和時間で定義したワイセンベルグ数で整理す

ると、いずれの溶液の結果についても、ほぼ同一の曲線上にあることがわかる。これより粘弾性流体の急縮小流路における剥離泡長さはワイセンベルグ数で整理できることが明らかとなった。しかしながら一方で、McKinleyらの結果とは一致していない。

Suzuki (2010)は粘弾性流体の剥離泡長さは、広流路幅 W を 40mm と固定して、 H を 5~20mm に変更した実験を行い、簡易な解析により以下のような流路拡大比 $\beta=W/(W-H)$ とワイセンベルグ数の関数に比例するとした。

$$\frac{x_s}{H} \propto \frac{2We}{\beta}(\beta^2 + \beta + 1) \quad (5)$$

図 11 に本関数に対する剥離泡長さを示す。図中の実線は Suzuki(2010)の実験結果である。本研究では拡大比が 2 と一定であるので、本結果は図 10 で示した結果と同様に、剥離泡長さがワイセンベルグ数で整理できることを示しているに過ぎない。一方で、マクロ流路で示した剥離泡長さの結果と一致しておらず、マイクロ流路における剥離泡形成構造は、マクロ流路と本質的に異なる可能性を示唆している。

3・3 流動不安定性

図 12 に流動様式のマップを示す。横軸は Rodd らと同様にゼロせん断粘度基準のレイノルズ数 $Re_0[-]$ とした。実線はタンギング流動が生ずる領域を、破線はバルジ構造が現れる領域を示す。また Rodd らによって両側急縮小・急拡大流路内の急縮小部で観察された流動不安定性が生ずる領域を一点破線で示した。

図より、タンギング流動はやや値が大きいものの Rodd らの不安定性と同様にワイセンベルグ数がある値以上となった場合に生じ、比較的高レイノルズ数では、ほぼ一定のワイセンベルグ数で生ずることがわかる。このことから本研究で観察されたタンギング流動不安定性は Rodd らが観察した慣性弾性不安定性とほぼ同一の機構によって生じていると推測される。一方でバルジ構造の現出は、 $\xi=3$ 以下でのみ観察されており、タンギング流動のように一定のワイセンベルグ数で観察されていない。このことからバルジ構造の出現および不安定性に関しては同一の機構によって生ずるものではないと思われる。今後より詳細な検討が必要である。

Fig. 12 Flow map on the instability occurrence.

The present tonguing motion appears in a higher Weissenberg number range than that reported by Rodd et al. (2005), but the tendency on Reynolds number is the same as them. However, the bulge structure appearance tendency is not the same as the inertio-elastic instability reported by Rodd et al.

4. 結 言

本研究ではマイクロキャビティ内で生ずる不安定流動に関して、流れの可視化実験によって検討した。キャビティ深さ、キャビティ長さ、広流路幅およびスパン方向厚さをそれぞれ 200 μm , 1000 μm , 400 μm および 200 μm と固定し、水粘度基準のレイノルズ数 Re を $1.00 \times 10^{-1} \sim 100$ まで変更して実験を行った。また試料としてカチオン系界面活性剤／対イオンの混合溶液を用い、界面活性剤濃度を固定して対イオンの界面活性剤に対するモル比 ξ を変更することによって粘弾性特性の異なる 4 種の溶液に関する実験を行った。その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 粘弾性が強い $\xi = 1.5$ の場合には、 $Re > 1$ でキャビティ下流部に形成される剥離泡上流端が揺動するタンギング流動が観察された。また $Re > 50$ でキャビティ上流上方端からの剥離流が上流側壁に再接近するバルジ構造が観察された。
- 2) 粘弾性が弱くなるほど、すなわち ξ が大きくなるほど、タンギング流動はより高レイノルズ数で現れる。
- 3) 再付着長さは粘弾性を強く示す場合、バラス効果によって非常に小さい値を示すが、バルジ構造の現出によって若干増加する。
- 4) 剥離泡長さはあるレイノルズ数で水の値より大きくなるが、あるレイノルズ数で一旦ピークをとったあと、その後減少する。この剥離泡長さが上昇するレイノルズ数は ξ が大きくなるに従って増加する。
- 5) 剥離泡長さは、それぞれの溶液の最大緩和時間で定義したワイセンベルグ数によって整理されるが、ミリオーダーで行った実験の結果とは一致しない。
- 6) バルジ構造はタンギング流動の不安定性出現と関連せず、別の機構によって生ずる。

References

- Armaly, B. F., Durst, F., Pereira, J. C. F. and Schönung, B., Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 127 (1983), pp. 473-496.
- Bothe, D., Stemich, C. and Warnecke, H.-J., Fluid mixing in a T-shaped micro-mixer, *Chemical Engineering Science*, Vol. 61 (2006), pp.2950-2958.
- Breslauer, D. N., Muller, S. J. and Lee, L. P., Generation of monodisperse silk microspheres prepared with microfluidics, *Biomacromolecules*, Vol. 11 (2010), pp.643-647.
- Falk, L. and Commenge, J.-M., Performance comparison of micromixers, *Chemical Engineering Science*, Vol. 65 (2010), pp. 405-411.
- Gulati, S., Dutcher, C. S., Liepmann, D. and Muller, S. J., Elastic secondary flows of semidilute DNA solutions in abrupt 90° microbends, *Physical Review E*, Vol. 78 (2008), #036314.
- Hessel, V., Löwe, H. and Schönfeld F., Micromixers: A review on passive and active mixing principles, *Chemical Engineering Science*, Vol. 60 (2005), pp.2479-2501.
- Hidema, R., Suzuki, H. and Komoda, Y., Elastic instability of hyaluronate solution in micro abrupt contraction-expansion Channels, *Proceedings of AIChE Annual Meeting* (2014), #381883, Atlanta.
- Kashid, M., Renken, A. and Kiwi-Minsker, L., Mixing efficiency and energy consumption for five generic microchannel designs, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 167 (2011), pp.436-443.
- Larson, R.G., Instabilities in viscoelastic flows, *Rheologica Acta*, Vol. 31 (1992), pp.213-263.
- Lin, X. Z., Terepka, A. D. and Yang, H., Synthesis of silver nanoparticles in a continuous flow tubular microreactor, *Nano Letters*, Vol. 4, No. 11 (2004), pp. 2227-2232.
- Luty-Blocho, M., Wojnicki, M., Paclawski, K. and Fitzner, K., The synthesis of platinum nanoparticles and their deposition on the active carbon fibers in one microreactor cycle, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 226 (2013), pp. 46-51.
- McKinley, G. H., Raiford, W. P., Brown, R. A. and Armstrong, R. C., Nonlinear dynamics of viscoelastic flow in axisymmetric abrupt contractions, *Journal of Fluid Dynamics*, Vol. 223 (1991), pp. 411-456.
- Mae, K., Advanced chemical processing using microspace, *Chemical Engineering Science*, Vol. 62 (2007), pp. 4842-4851.
- Mills, P. L., Quiram, D. J. and Ryley, J. F., Microreactor technology and process miniaturization for catalytic reactions-A perspective on recent developments and emerging technologies, *Chemical Engineering Science*, Vol. 62 (2007), pp. 6992-7010.
- Mouza, A.A., Patsa, C.-M. and Schönfeld, F., Mixing performance of a chaotic micro-mixer, *Chemical Engineering Research*

and Design, Vol. 86 (2008), pp.1128-1134.

Park, J.-Y., Kim, Y.-D., Kim, S.-R., Han, S.-Y. and Maeng, J.-S., Robust design of an active micro-mixer based on the Taguchi method, Sensors and Actuators B, Vol. 129 (2008), pp.790-798.

Pohar, A. and Plazl, I., Process intensification through microreactor application, Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, Vol. 23, No. 4 (2009), pp.537-544.

Rodd, L. E., Scott, T. P., Boger, D. V., Cooper-White, J. J. and McKinley, G. H., The inertio-elastic planar entry flow of low-viscosity elastic fluids in micro-fabricated geometries, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Vol. 129 (2005), pp. 1-22.

Sallic, A., Tusek, A. and Zelic, B., Application of microreactors in medicine and biomedicine, Journal of Applied Biomedicine, Vol. 10 (2012), pp. 137-153.

Stoeber, B., Liepmann, D. and Muller, S. J., Strategy for active mixing in microdevices, Physical Review E, Vol. 75 (2007), #066341.

Suzuki, H., Separation characteristics of visco-elastic fluid in a cavity, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 43, No. 5 (2010), pp. 421-428.

Suzuki, H., Hamamura, J., Katsuda, T., Komoda, Y., Katoh, S. and Usui, H., Size characteristics of liposomes formed in a micro-tube, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 41, No. 8 (2008), pp. 739-743.

Suzuki, H., Higuchi, Y., Komoda, Y. and Hidema, R., Effect of the molar ratio of counter-ions on flow characteristics of surfactant solutions sweeping cavities, Proceedings of the 23rd International Symposium on Transport Phenomena (2012a) #156, Auckland.

Suzuki, H., Higuchi, Y., Watanabe, H., Komoda, Y., Ozawa, S., Nishimura, T. and Takenaka, N., Relaxation behavior of a drag-reducing cationic surfactant solution, Nihon Reoroji Gakkaishi, Vol. 40, No. 2 (2012b), pp. 85-90.

Suzuki, H., Sato, H., Hidema, R. and Komoda, Y., Bulge structure in a cavity swept by a viscoelastic fluid, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 530 (2014), # 012055.