20511 二次元マイクロチャンネル内の二液混合反応における脈動流の効果に関する検討

Experimental Study on Mixing Behavior
in Micro Non-Element Chaotic Mixer

○学 稲垣 聡 (中部大学大学院) 正 平沢 太郎 (中部大学) 正 植田 利久 (慶応大学)

Satoshi INAGAKI, Chubu University, Matumoto-cyu1200, Kasugai-shi, Aichi-ken
Taro HIRASAWA, Chubu University
Toshihisa UEDA, Keio University

Abstract: As a first stage of developing the micro non-element chaotic mixer, mixing behavior in the micro channel where pulsating subsidiary stream meets main stream at one points instead of a few points is investigated in the present study. The folding and stretching trajectories that potentially lead to the chaotic trajectories are observed. The present non-element chaotic mixer is shown to reduce mixing time. It should be noted that the even one pulsated subsidiary stream enhance the product ratio up to 1.3 time larger than that without pulsation. Experimental observations show that smaller duty ratio of pulsation induce more folding and stretching of material lines.

Keywords: Chaotic mixing, Micromixer, Microfluidics

1. 緒言

ガラス, アクリルおよびシリコンを基板とし, その上に数 μm ~ 数百 μm の微細加工を施し, 反応, 混合および析出するなどの作業をマイクロスケールで行なう研究が注目されている⁽¹⁾. 反応空間をマイクロ化することで微小空間特有の効果がある⁽²⁾ ことはよく知られており, 具体的には以下のような効果がある. 微小空間で反応を行なうと, 単位体積あたりの界面積が大きくなり反応が増加する. また, 流路が小さいため使用する試薬が微量であるため, 危険物質および危険性のある反応への適用にも可能であり, 廃液も低減できる. さらに, マイクロチャンネルで合成すると粒子径が小さくなる⁽³⁾. 一方で, 流路が数 ~ 数百 μm と極めて狭く, 通常, 混合・反応を促進するために有利な方法であると考えられている乱流化が困難である. また通常, 混合器に用いられるスタティックミキサーに用いられるエレメントなどを流路内に装着することが困難である. また, 生成物ができる反応, 固体のある反応であると生成物または固体によって流路を塞がれる可能性があるなどの欠点もある.

本研究では, アクリル平板上にマイクロ流路を加工し, 二液を反応・混合させる実験を行なった. また, 流路内の流速をより一定にするために出口から二液を吸引することにした. 支流の流れを脈動させることにより, 単位長さにおける二液の界面積を増やし反応・混合を促進させることについて検討を加えた.

2. 実験方法

横 40mm, 縦 20mm, 厚さ 3mm のアクリル平板上に幅 0.5mm, 深さ 0.2mm, 長さ 30mm の主流流路と幅 0.2mm, 深さ 0.2mm, 長さ 9mm の支流流路を加工した. 支流は主流流路の中央で直角に交わる. 図 1 に示すように, 流路内の混合および反応の様子をマイクロレンズ (Nikon 製, AF Micro Nikkor 105mm F2.8D) を装着した CCD カメラ (Basler 製, A312f) を用いて撮影する. 撮影されたデ

ジタル画像データは IEEE1394 経由で PC に送られ記録される. また, 証明にはマイクロリアクターの背後から蛍光板を用いた.

PC で制御されている二つのマイクロフィーダーを使用する. 一は水溶液 B を支流流路に送り, もう一つが主流流路から混合液を吸引する. 主流の吸引口と反対側の流路の端は, 水溶液 A を主流流路に送るために, 水溶液 A の入ったボトルとつながっている.

3. 結果考察

マイクロ流路内の混入・反応を可視化するために, 支流に $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.01 mol/l の水溶液を主流に KSCN 0.02mol/l 水溶液を用いることにする. 以下の式に示されるように水溶液がイオン反応する. Fe^{3+} は明るい黄色, SCN^- が無色, $\text{Fe}(\text{SCN})_2^+$ は赤褐色である. 反応物の色が反応液の色に比べて極めて濃いため, 反応状態を容易に認識することができる.

図 2 は, 流れが定常状態で主流流量 0.20 $\mu\text{L/s}$, 支流流量, 0.10 $\mu\text{L/s}$ における反応の様子を示す. 主流は右から左

Fig.1. Schematic drawing of experimental setup. (1)Micro mixer. (2) Syringe for product suction. (3)Syringe for $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ solution. (4) KSCN solution tank (5)CCD camera. (6) PC.

Fig.2. Image of product profile in steady flow. The main stream flows from right to left. The mainstream flow rate is $0.20 \mu\text{l/s}$ at the outlet. The subsidiary stream flow rate is $0.10 \mu\text{l/s}$

図2は、流れが定常状態で主流流量 $0.20 \mu\text{l/s}$ 、支流流量、 $0.10 \mu\text{l/s}$ における反応の様子を示す。主流は右から左へ流れる。濃い色の部分は反応物を示し、主流と支流の界面で観測される。主流と支流の交差点の後に、反応物分布は直線状に形成され、出口に向かうほど広がっており分子拡散が進んでいるの様子がわかる。図3には、流れが脈動する様子を示す。主流の流量は $0.20 \mu\text{l/s}$ 、支流の流量は $0.05 \pm 0.01 \mu\text{l/s}$ で実験を行った。1周期 T_f を2sとして、支流から水溶液を供給する時間 T_h を $1.0\text{s} \sim 0.1\text{s}$ として実験を行い、デューティー比 T_h/T_f を用いて結果を整理した。(a-1)~(a-5)はデューティー比が0.50の様子を示し、(b-1)~(b-5)は0.10の脈動の様子を示す。写真の間隔は0.4sである。デューティー比が0.50の脈動は、定常状態に近く主流と支流の界面があまり変動せず、反応物分布が広がっている。一方0.10の場合は、脈動の様子がよくわかり、主流と支流の界面で大きな凸形の変動が見られる。そこで、流れの中で反応物が占めている割合すなわち、反応割合 Y_p を得るために、次の式を基に画像解析を行った。

$$Y_p = \frac{I_m - (3I_a + I_b)/4}{I_p - (3I_a + I_b)/4} \quad (1)$$

Fig.3. Sequential images of product distribution in pulsed subsidiary stream. The flow rate at exit port is $0.20 \mu\text{l/s}$. Time-mean flow rates of pulsed subsidiary streams are $0.05 \pm 0.01 \mu\text{l/s}$. The Period of one cycle, T_f is 2s. The duty ratio of subsidiary flow is (a1)~(a5) 0.50 (b1)~(b5) 0.10.

Fig.4. Time-mean product ratio derived from image analysis for 2 cycles against duty ratio.

I_p は反応部分の輝度、 I_a は $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 水溶液の輝度、 I_b は KSCN 水溶液の輝度、 I_m は検査領域内の輝度の平均値を表す。検査領域内の輝度の平均値である。検査領域内は、図2で示されるように $0.2\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ の長方形で、支流の中心から出口へ 2.0mm の場所とした。

図4に、デューティー比の変化による2周期の間の平均反応割合を示す。デューティー比が1.0と0.50の間には有意な差が無く、0.50以上では準定常状態と見なすことができる。デューティー比が0に近づくにつれて平均反応割合も増加している。デューティー比0.10でピークを迎え、デューティー比が0.05になると若干減少している。原因としては、フィーダーを含む脈動流系の応答性の影響が考えられる。総じて、デューティー比が小さくなるほど脈動が大きくなり、平均反応割合も増加する傾向があることがわかる。

4. 結言

支流の流れを脈動させることにより、単位長さにおける二液の界面積を増やし反応・混合を促進させる実験を行ない、輝度を用いて反応を評価した。時間平均反応割合は、デューティー比が0.50と1.0では有意な差がないが、0.10に近づくほど高くなる。よって、支流の流れを脈動させることにより反応が促進させることが示された。

参考文献

- (1) 東ソー研究・技術報告 第47巻 2003, pp3-8 川井 明, 松本 進一, 桐谷 英昭 他,
- (2) 化学工学 第63巻 1999 pp27-30 岡本 秀穂
- (3) 化学工学会 第68年会講演予稿集 2003 C123 入江 敬介, 外輪 健一郎, 草壁 克己