

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03954

研究課題名(和文) マランゴニ効果を活用したスラグ流内の急速混合新技術

研究課題名(英文) A new rapid mixing technique in slag flow using the Marangoni effect

研究代表者

小野 直樹 (Ono, Naoki)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：20407224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はミニチャンネルを利用して形成されるスラグ流の内部にマランゴニ対流を発生させることにより、小体積ながら簡便かつ高速の液体混合デバイスを実現することを目的としたものである。研究の結果、マランゴニ対流を微細流路内のスラグ流に対して適用することで、スラグ内に激しい循環渦の発生が可能であることがわかり、高速混合のポテンシャルを確認することができた。しかし実用化に向けてサイズを大きく誘導すると、深さ方向にも流れが起こり、複雑な三次元対流になることが分かった。この三次元対流は、液の高速混合をさらに促進すると考えられるため、その発生条件や機構を今後解明していくことが必要であることがわかった。以上

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究がもたらす意義として、学術面ではマランゴニ対流が微細流路内のスラグといった微小空間内に引き起こす効果が定量的に実施例として示されたこと、およびこの技術を将来実用的に展開するにあたっての新しいファクター(ここでは三次元流の発生)を明らかにできたことである。社会的な意義としては、この方法は高速混合のための駆動力が自然発生的な現象(マランゴニ対流)を用いているために特別な動力が不要であることから、省エネルギー・省公害・省資源社会実現への貢献に寄与する点が挙げられる。以上

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to realize a simple and high-speed liquid mixing device in a small volume by generating Marangoni convection inside a slug flow formed by using a mini-channel. As a result of the research, it was found that the Marangoni convection could be applied to a slug flow in a microchannel to generate a strong circulating vortex in the slug, and the potential for high-speed mixing was confirmed. However, when the size of the channel device was increased for practical use, it was found that flow occurred also in the depth direction, resulting in complex three-dimensional convection. Since this three-dimensional convection is thought to further promote high-speed mixing of liquids, it is necessary to elucidate the conditions and mechanisms of its occurrence in the future.END

研究分野：流体工学

キーワード：マランゴニ効果 マイクロ混合 スラグ流 PIV マイクロ流路 物質移動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

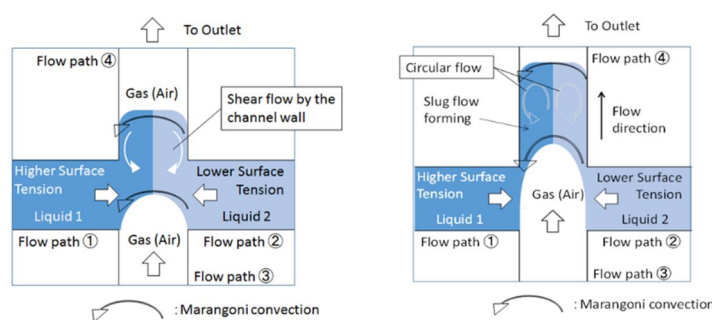
1. 研究開始当初の背景

微細流路(ミニチャンネル)内をスラグ化された液相が通過する際に、流路壁内側で生じるせん断応力によってスラグ内部に一定の循環流が発生し、スラグ内の熱・物質輸送係数が大幅に向上することが知られている。近年、気液自由界面上に発生するマランゴニ対流によっても熱・物質輸送速度は大きく向上することが報告されている。但し、マランゴニ対流を微細流路内のスラグ流内の混合機構へ適用するためには、流量や流動形式などの制御が必要で、未解明な部分が多い状態であった。

2. 研究の目的

本研究は、ミニチャンネルを利用して形成されるスラグ流の内部にマランゴニ対流を発生させることにより、小体積ながら簡便かつ高速の革新的液体混合デバイスを実現することを目的とし、実用的なデバイスへの応用に必要とされる条件や設計指針を得ることを目指した。

具体的には、二液混合促進に向けたマランゴニ対流の活用方法として、図1に示すように、十字流路合流部を持つミニチャンネルを利用して形成されるスラグ流内部にマランゴニ対流を発生させることにより、スラグ流形成直後に速やかに二液の混合を終了させる機構を考案し、混合流の発生条件や流れの詳細を調べることを目的とした。

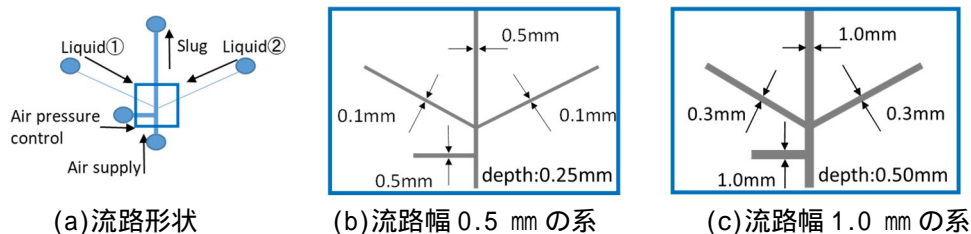


(a)混合初期 (b)その後の状態
図1 マランゴニ対流を活用したスラグ内の急速混合の概念図

3. 研究の方法

(1) 実験で用いたミニチャンネル

混合促進機構の詳細を観察するために、図2(a)のような形状の流路を考案し、主に図2(b)の流路幅0.5mm、流路深さ0.25mm、および図2(c)の流路幅1.0mm、流路深さ0.5mmの二つを作成して、試験流体として純水(表面張力73mN/m)および酢酸水溶液(濃度60wt%,表面張力38mN/m)を用いた流動実験を行い、2次元PIV(Particle Image Velocimetry,トレーサー粒子の画像を追跡することで流れ場を解析する手法)によるスラグ流内の流れ解析を行った。流動条件は、(b)の流路幅0.5mmの場合は純水および酢酸水溶液ともに4.0 μ l/minで流入させており、スラグを上方に移動させるために下方から空気を0.5ml/minで入れており、図(c)の流路幅1.0mmの場合は、液をともに16.0 μ l/minで流入させており、下方から空気を1.4ml/minで入れた。トレーサー粒子として直径2 μ mのアクリル粒子を用いた。



(a)流路形状 (b)流路幅0.5mmの系 (c)流路幅1.0mmの系
図2 実験で用いた流路形状と二種の流路幅

(2) 三次元観察手法

後で詳述するが混合能力を向上させるために設定した流路幅の大きな図2(c)で観察を行ったところ、流路平面方向に加えて流路深さ方向についても特異な流れが三次元的に発生していることが観測された。この三次元流れは混合に非常に有効であるため、流れの三次元構造を可視化観察することが必須と考えた。PIVの三次元可視化技術をここでの微細領域の流れに適用できるように改良して、観察に用いることにした。

4. 研究成果

(1) 流路幅 0.5 mm の系での結果

図3 (a)に二液合体後 0.1 秒後、および図3 (b)に 0.14 秒後の流れの可視化写真を示す。

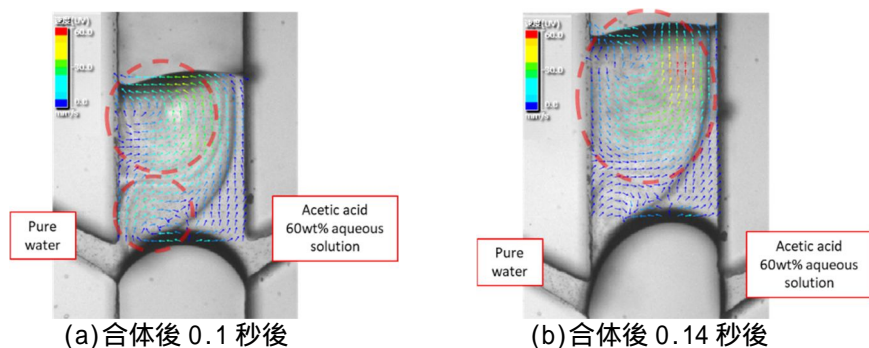


図3 流路幅 0.5 mm の流路でのスラグ流内部のマランゴニ対流の様子

この画像からわかるように、流入する二液の表面張力の差によるマランゴニ対流が合体直後から激しく生じていることがわかる。スラグの上面と下面に二つの自由界面があるため、上と下にマランゴニ対流の渦が発生している。上部の渦は大きく、また部分的に 40 mm/s の高速な流れが生じていること分かります、二液を速やかに混合している様子が見てとれた。

(2) 流路幅 1.0 mm の系での結果

図4に可視化画像を示す。図4 (a)は PIV の解析結果、図4 (b)は(a)の赤枠部分で読み取った速さの分布を示す。

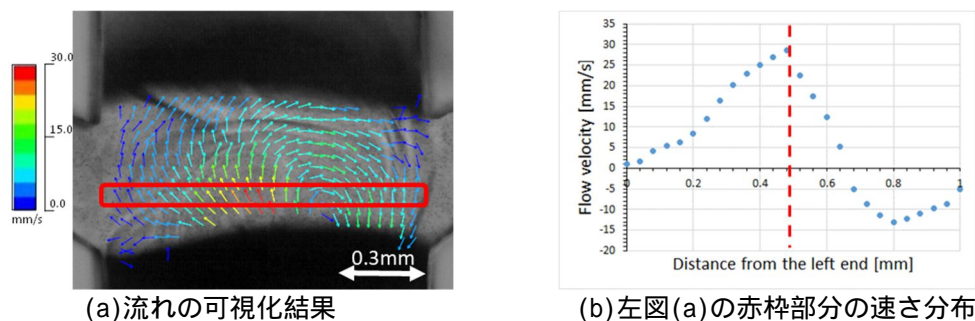


図4 流路幅 1.0 mm の流路でのスラグ流内部のマランゴニ対流の様子

この流路幅 1.0 mm の場合でも二液が合体後にマランゴニ対流が発生し、部分的には 30 mm/s もの速い対流が生じていることがわかった。しかしこの場合の流れの詳細を調べると、深さ(ここでは 0.5 mm)が大きいので、流れは深さ方向にも強く発生しており、二次元的な観察では渦の流れパターンを正確に把握できないことがわかった。この三次元的な流れは強く発生しており、液混合に大きく寄与していることがわかった。

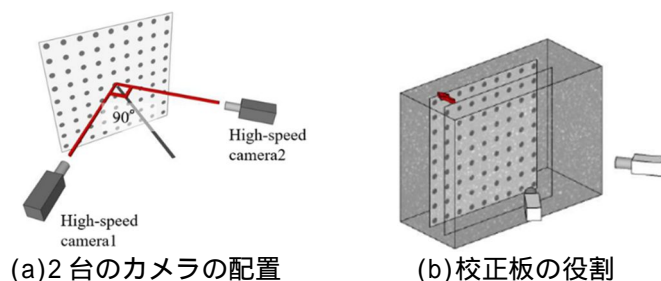
この研究の将来の実用化を目指す場合に、混合の処理能力の向上は不可欠で、そのためにはある程度の流路の拡大は必要であろう。そしてそこでは三次元のマランゴニ対流が大きく寄与すると推察されたため、流れの三次元観察をまず実施する必要があると考えた。

(3) 三次元観察手法の開発

上記の(2)での結果を踏まえて、PIVを三次元観察に用いることを進めた。三次元観察を行うためにここでは二台のカメラを用いるステレオ PIV 法を用いることにした。一般のサイズ(cm から m のサイズ)の流れに対してはこのステレオ PIV 法はほぼ確立しており、他の研究報告例も見られる。しかし、それらと異なり、ここでの 1 mm 以下のサイズの領域のステレオ PIV 技術については、前例がほとんどなく、独自に構築を進める必要があった。その結果、二台のカメラの焦点および精度校正のために微細な校正板がまず必要であることがわかった。このサイズの校正板は市販されていないために自作した。

この関係の事情を図5で説明する。図5 (a)のように二台のカメラ(高速ビデオカメラ)を用いて互いに斜めから画像をみて、その焦点面からのトレーサーの動きを画像処理によって捉えることができれば、奥行き方法のトレーサーの速度も計算できることになる。図5 (b)のように、観察したいスケールの視野のサイズの校正板(通常奥行き方向に段がある周期的パターン形状)を用意して2台のカメラの画像をうまく校正すれば、単に見えている二次元的な速度に加えて、画

面奥行方向の速度も算出できるのである．実際は画像処理専用のソフトウェアが画像データから計算する．



(a)2台のカメラの配置

(b)校正板の役割

図5 二台のカメラを用いたステレオPIV法の概念図

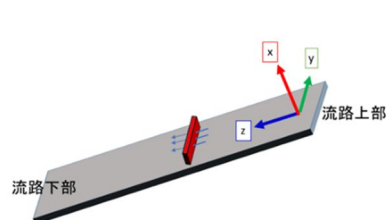


図6 検証に用いた直線流

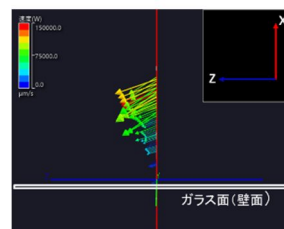


図7 得られた奥行方向の速度分布

その後、この作成した校正板を用いて構築した光学系を用いて微細流路内のマランゴニ対流の観察を進めたが、あいにくコロナ禍のために実質半年以上も実験の実施ができなかった。しかし単純な平板上の微小流れを用いて、三次元観察が可能かどうかの検証までを実施することができた。その結果、構築したステレオPIVシステムにて1 mm以下の領域の三次元的な速度の計測が可能であることを示すことができた。検証にもちいた平板上の流れの概念図を図6に、得られた画像の例を図7に示す。観察した視野の面(図7の赤色部分)に垂直な方向の速度分布が捉えられていることが図7からわかる。

(4) 成果のまとめ

ここでの研究の結果、マランゴン対流を微細流路内のスラグ流に対して適用することで、スラグ内に激しい循環渦の発生が可能であることがわかり、高速混合のポテンシャルを確認することができた。しかし実用化に向けてサイズを大きく誘導すると、深さ方向にも流れが起こり、複雑な三次元対流になることが分かった。この三次元対流は、液の高速混合をさらに促進すると考えられるため、その発生条件や機構を今後解明していくことが必要であろう。今回の研究の後半に開発を進めた、微細な領域にも適用できる三次元PIV技術を適用して可視化し、今後はスラグ内のマランゴニ対流の詳細な三次元流の構造や発生機構を調べていく必要がある。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takashi Yamada and Naoki Ono
2. 発表標題 VISUALIZATION OF THE MARANGONI CONVECTION IN A SLUG FLOW FORMED IN A MICROCHANNEL
3. 学会等名 29th International Symposium on Transport Phenomena(Nov.1, 2018), (Hawaii Convention Center, Honolulu HI, USA), Proceedings, ISTP29-067(USB Memory) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 山田崇・小野直樹の共著	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 10
3. 書名 「流動解析 ノウハウと不良対策 事例集」の一つの節を執筆	

1. 著者名 山田崇・小野直樹の共著	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 11
3. 書名 「フロー合成、連続生産のプロセス設計、条件設定の応用事例」の一つの節を執筆	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	丹下 学 (Tange Manabu) (70549584)	芝浦工業大学・工学部・准教授 (32619)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	山田 崇 (Yamada Takashi) (90791947)	芝浦工業大学・工学(系)研究科(研究院)・研究員 (32619)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関