

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13680

研究課題名(和文) 3-D shape measurement of liquid film and gas bubble of slug flow in microchannels with axial plane optical microscopy

研究課題名(英文) 3-D shape measurement of liquid film and gas bubble of slug flow in microchannels with axial plane optical microscopy

研究代表者

李 艶栄 (LI, Yanrong)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授

研究者番号：20712821

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：光軸に平行な深さ方向の画像が直接撮れるAxial Plane Optical Microscopy (APOM) システムを利用した顕微鏡システムを組んで、AxialとLateral Planeについて、ミラーの角度を変化させながら撮影を行った。また、それらの画像についてミラー角度の変化と取得画像の変化の関係について評価を行った。実験によって、Axial Plane 画像の撮影において、ミラーの角度と取得画像が比例的に変化することが確認できた。また、純水と5種類のシリコンオイルを用いて粘度および流量の変化によるマイクロ流路内スラグ長さの変化を測定し、マイクロ流路内の流動特性を定性的に評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

APOM システムを利用した光学顕微鏡で、ミラーの角度を変化させながら撮影を行った。取得画像についてミラー角度と取得画像の変化について評価を行った。実験によって、Axial Plane画像取得用のカメラの撮影において、ミラーの角度と取得画像が比例的に変化することが確認された。混相流については、T型マイクロ流路を用いた中空繊維状基材への応用の研究や、リチウムイオン高速抽出プロセスの開発などがされているが、気液、固液、固気混相流などの研究に比べると、液液二相流の研究事例はいまだ数が少なく、液液二相スラグ流のスラグ長さの予測やコントロールは重要な研究課題だと思われる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we constructed an axial plane optical microscopy (APOM) system, that can directly take images in the depth direction parallel to the optical axis, and can take images at the axial plane and lateral plane simultaneously by changing the angle of mirror. We also evaluated the relationship between changes in the angle of mirror and variations in the acquired images for those images. Through the experiment, it is confirmed that the angle of the mirror and the acquired image changed proportionally when the axial plane image is taken. In addition, changes in the dispersed phase and continuous phase length in the microchannel due to changes in viscosity and flow rate are measured, and the flow characteristics in the microchannel are qualitatively evaluated, using pure water and five different silicone oil.

研究分野：流体力学

キーワード：APOM顕微鏡 スラグ流

1. 研究開始当初の背景

近年、医療分野やバイオテクノロジー分野などにおいて活発な研究開発がなされ、様々な発見と著しい発展を遂げている。また、それらの研究開発に必要な不可欠なものとして広く光学顕微鏡が活用されている。

顕微鏡の誕生により人々は、人間の目に見えないレベルで起こっている事象を観測することが可能となった。これによる恩恵は特に医療分野において顕著であった。これまでに発見されなかった細菌や病原菌を発見したり、人間の細胞や神経を観察することによって病気の原因を解明したり、新薬を発明するなど、顕微鏡によって人々の生活は発展した。また、医療分野に限らず、農業分野での遺伝子科学の発展により遺伝子組み換えの作物が開発され、工業分野では電子機器の小型化のようなコンピュータやスマートフォンといった私たちの生活をより豊かにする発明がなされている。近年では、生命科学の分野において活発な研究がなされている。それに伴い、さまざまな用途で顕微鏡が必要とされており、2000年代以降様々な用途に応じた顕微鏡が研究開発されている。

また、近年、化学分野、工学分野等において化学反応の効率化や精緻化などの研究が進められている。それらの研究により、マイクロスケール流路内においては、流体は層流で重力の影響を受けにくく、表面張力が支配的であり、乱れが生じにくいという性質のほか、マイクロスケールの流路内においては物質の混合が促進されるため、従来の装置に比べて混合が高速化されることが知られている。

これらの性質を基に、混相流については、T型マイクロ流路を用いて硬化性樹脂及び不溶性流体(光学的機能性材料)のスラグ流を中空繊維状基材へ流し、それを紫外線や熱の照射など樹脂を硬化させ固定することで、樹脂の隔壁と流体材料を封入したセル状容器が並ぶ中空基材内部構造を得るプロセスを考案しており、それを大面積表示デバイスへと応用することを目指している。また、物質混合の促進を利用したリチウムイオン高速抽出プロセスの開発などがされている。しかし、気液、固液、固気混相流などの研究に比べると、液液二相流の研究事例はいまだ数が少なく、また、上記の研究でも述べられているが、液液二相スラグ流のスラグ長さの予測やコントロールは重要な研究課題ではあるものの、解明には至っていない。

これについて、流量比一定の状態では流量を増加させると、分散相・連続相ともにスラグ長さが減少する傾向にあるということ、流量増加に伴う We 数の増加によりスラグ形成挙動が界面張力支配である Squeezing モデルからせん断応力支配である Shearing モデルに遷移することが報告されている。また、一方の相のスラグ長さが増加するとその次の瞬間に形成されるもう片方のスラグ長さが減少するといったことも報告されている。

しかし、これらの研究においては流量や流量比の変化については考えられているものの、粘度の変化については考えられていない。

2. 研究の目的

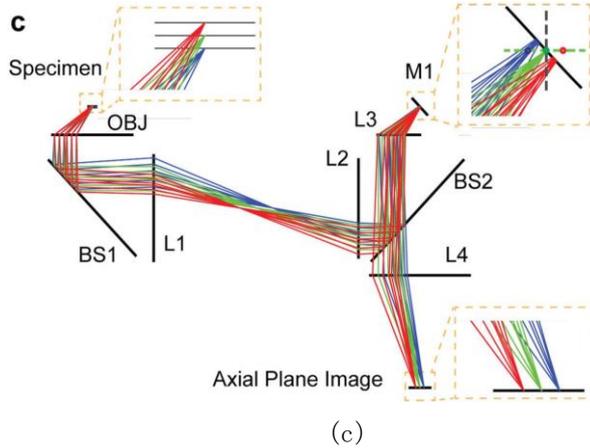
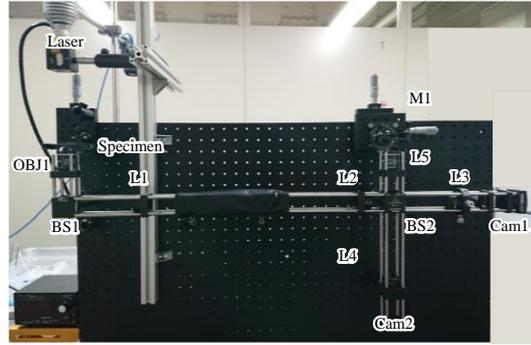
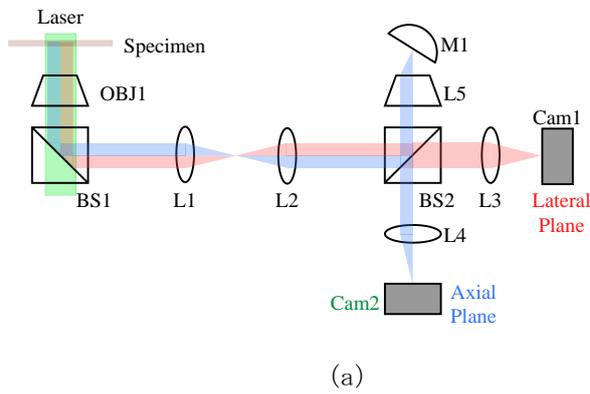
本研究では、近年の顕微鏡の発展において新しく考案された Axial Plane Optical Microscopy (APOM) について注目する。APOM は新しい光学顕微鏡システムであり、光軸に平行な深さ方向の画像を直接撮ることを可能とする顕微鏡システムである。この APOM システムを用いた顕微鏡で撮影と計測を行った。

また、本研究では、マイクロ流路内におけるスラグ流の特性に着目した。ここでは、液相物質の粘度および流量の変化によるマイクロ流路内スラグ長さの変化を測定し、マイクロ流路内の流動特性を定性的に評価することを目的とした。

3. 研究の方法

APOM は、スキャンを用いずに対物レンズの光軸に平行な試料の断面を、直接画像化することが可能な光学顕微鏡である。図1に APOM システムの概略として、実験で使用した装置概要図を示す。対物レンズ (OBJ) と、レンズ (L3) はともに油浸対物レンズを使用した。また、他のレンズ (L1、L2、L4、L5) はチューブレレンズである。BS1 と BS2 はビームスプレッタであり、BS1 は光を 90:10 で、BS2 は 50:50 で反射と透過をする。M1 はミラーであり、L5 の光軸に対して任意 ($0 - 45^\circ$) に傾けることが可能である。このミラーにより光軸に垂直方向平面の画像 (Lateral Plane) を光軸に水平方向平面 (Axial Plane) の画像に変換する。実験では、組み立てた APOM システムを用いてマイクロルーラとグラスファイバについて、Lateral Plane の画像と Axial Plane (図2) の画像を撮影した。Cam1 と Cam2 のそれぞれで撮影を行い、Cam2 の撮影においては、M1 の角度を 0 から 5° ずつ変えながら撮影を行う。

スラグ流特性評価の実験装置は、連続相導入部、分散相導入部、混合部、可視化部からなっており、流路にはポリテトラフルオロエチレン (PTFE) チューブを使用している。この PTFE チューブをシリンジに接続し、マイクロシリンジポンプによって連続相、分散相を流路へと供給する。マイクロシリンジポンプによって供給された流体は T 型混合路によって混合されたのち流路下部において顕微鏡に接続したハイスピードカメラによって撮影される。スラグ長さはハイスピードカメラによって撮影された画像から計測を行う。



L1, L2, L3, L4	Achromatic Tube Lens	$f = 150 \text{ mm}$
OBJ1	Objective Lens	NA = 1.4 (100x)
BS1, BS2	Beam Splitter	90 : 10, 50 : 50
L5	Remote Lens	NA = 1.4 (100x)
Cam1, Cam2	Camera	1280 x 1024 pix

図1 (a) APOM 実験装置概要図 (b) 実験装置の写真
(c) APOM システムにおける Ray Tracing Simulation (d) 光学部品の詳細

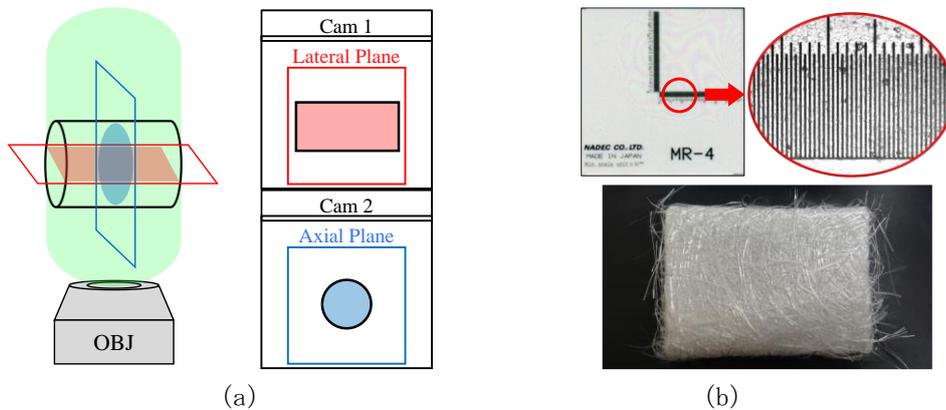


図2 (a) 平面画像と断面画像のイメージ図
(b) 観察対象：マイクロラ（上図）とグラスファイバ（下図、直径は1.3 μm ）

4. 研究成果

(1) 光軸に平行な深さ方向の画像が直接撮れる光学顕微鏡システムの研究開発

図3に撮影結果の画像例を挙げる。マイクロラとグラスファイバのそれぞれの撮影結果を比較すると、どちらの画像にも共通した変化が見られた。1つは、ミラー角度が大きくなるほどに取得画像が暗く写るということ。2つ目に、ミラー角度が大きくなるほどに取得画像に傾きが現れるということである。

この2つの点に注目し、取得画像において計測を行い、ミラー角度の変化との関係をグラフにした。取得画像とミラー角度の関係についてのグラフを図4と図5に示す。画像の右側の測定点のグラフから左側の測定点のグラフへ向かって順にグラフの傾きが大きくなり、いずれのグラフにおいても、線形近似直線は比例する様子が見られるため、ミラー角度の変化と取得画像上に生じる変化との間には比例関係が成立するものと言える。

(2) マイクロ流路におけるスラグ流の流動特性評価

シリコンオイルのマイクロ流路内における流動様相を定性的に評価した。実験によって純水-シリコンオイルのスラグ長さを観察することができた (図6)。特に、粘度による変化およびその影響の大きさを得られたことは大きいと考えられる。

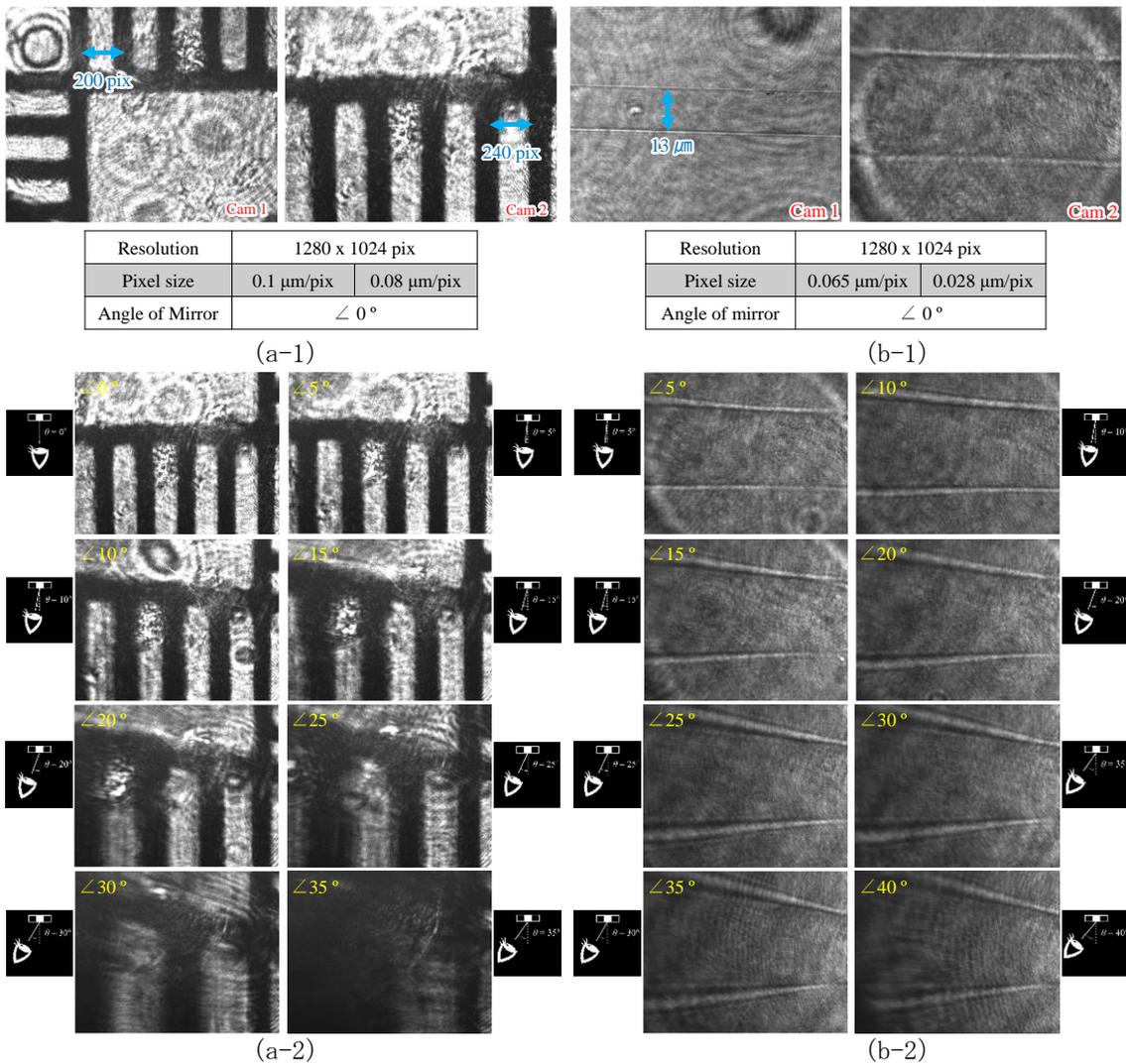


図3 撮影されたマイクロルーラ (左図) とグラスファイバ (右図) の画像

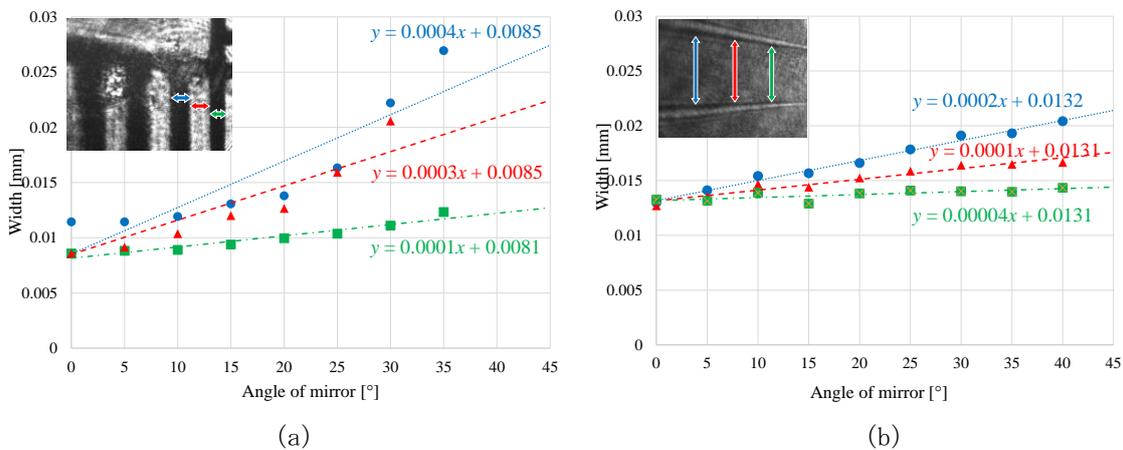


図4 線の幅 (マイクロルーラ)・繊維の径 (グラスファイバ) とミラー角度

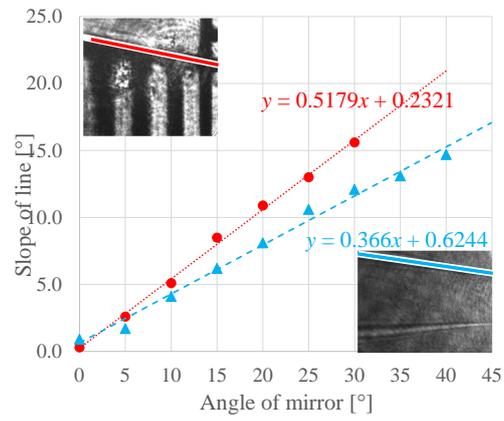


図5 取得画像の傾きとミラー角度

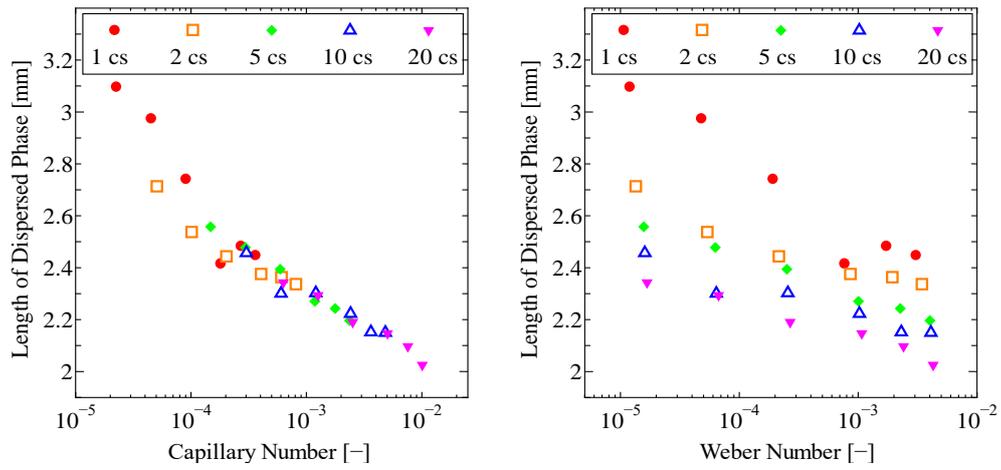


図6 キャピラリー数とウェーバー数に対する分散相のスラグ長さ変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 石川紀彰、大部葵、李艶栄、稲垣照美、染矢聡
2. 発表標題 微小流路内におけるスラグ流の可視化計測
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第27期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀本北斗、橋本宏紀、染矢聡、李艶栄、稲垣照美
2. 発表標題 ペンダントドロップ法を用いた界面張力とその温度係数計測
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第27期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西田竹広、稲垣照美、李艶栄
2. 発表標題 気液界面における伝熱・流動現象の赤外線サーモグラフィとスペクトル解析
3. 学会等名 化学工学会 第51回秋季大会（2020）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土田玄太、李艶栄、稲垣照美
2. 発表標題 常磁性流体の熱物性評価
3. 学会等名 化学工学会 第51回秋季大会（2020）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土田玄太、李艶栄、稲垣照美
2. 発表標題 光軸に平行な深さ方向の画像が直接撮れる光学顕微鏡システムの研究開発
3. 学会等名 日本機械学会 第27回茨城講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yanrong LI , Satoshi SOMEYA , Terumi INAGAKI
2. 発表標題 Quantitative flow visualization for micro-scale flow field based on quantum dots
3. 学会等名 The 12th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------