

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560183

研究課題名(和文) フォトクロミック色素マーキング法による界面流動計測法の開発

研究課題名(英文) Development of Measurement Method for Free Surface Flow using Laser Tagging Method by Photochromic Dye

研究代表者

天谷 賢児 (AMAGAI, Kenji)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：20221731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フォトクロミック色素マーキング法を用いて自由表面流れを計測する方法を開発し、液膜噴流や斜面を流下する液膜流れを調べた。フォトクロミック色素の着色点を形成するために、Nd:YAGレーザー(波長355nm)の紫外パルス光を用いた。液膜噴流に4点の着色を行い、その相対的な位置変化から、垂直ひずみや回転運動を評価した。これによって、液膜が分裂に至る前の液膜の変形や回転運動が明らかになった。さらに、傾斜壁面を流下する液膜の表面速度と表面波の速度を測定した。その結果、液膜の表面速度は、表面波が到達前はほとんど一定であるが、波の通過に伴って急激に増加することなどが確認できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, the laser tagging method by photochromic dye was developed for the study of free surface flow behavior. Flow characteristics of liquid sheet jet and surface flow on an inclined wall were investigated. Pulses of UV light (wavelength, = 355nm) by a Nd:YAG laser were used in order to form the photochromic dye traces. Liquid velocity was measured from the movement of dye traces. Moreover, by forming a set of 4-points of dye traces on the liquid sheet, normal strain, shear strain and rotational motions were estimated from change of relative positions of the dye traces. Liquid surface velocity and wave velocity for falling liquid films on inclined wall were simultaneously measured by the laser tagging method. As the result, it was confirmed that the liquid film moved in almost constant velocity before approaching the surface wave. When the wave was passing over the liquid film, the liquid film velocity rapidly increased.

研究分野：熱流体工学

キーワード：熱流体工学 レーザー計測 界面流動 自由表面流れ

### 1. 研究開始当初の背景

フォトクロミック色素マーキング法は、1962年にPopovichらによって導入された流れのレーザー計測手法の一種である。これは、紫外レーザー光を流体に照射して、流体自身に直接着色(マーキング)を行い、その移動量から流れの様子を調べるものである。流体に直接マーキングができることから、トレーサー粒子を混入させる必要のある他のレーザー計測手法(PIVやLDV)に比べて、流れの中の解析したい部分を選択的に抽出することができ、トレーサー粒子の流体への追従性の問題を回避することができる。ただし、光の照射方向に着色部が形成されるために、PIVのように流れの内部の一断面を抽出した解析が難しいという難点もある。しかしながら、レーザーが照射された流体に自由に着色できることから、様々な自由表面の流動解析に極めて有用な手法を提供できると考えられる。

### 2. 研究の目的

ここで研究するフォトクロミック色素マーキング法は、これまで主に流体内部の流れの解析に利用されてきた。これに対して、本研究では流体の自由表面の流動解析にこの手法を応用する。

特に、本研究ではこれまでに研究を行ってきた液体燃料の微粒化現象の解析や液膜流の解析にこの方法を用いることで、従来、計測が難しかった大きな変形や分裂を伴う界面流動現象の解析を行う。具体的な計測対象として、ノズルから噴射する液膜噴流の流動解析を行った。特に、液膜の形成から破断に至る過程で、液膜がどのような変形をたどるかを明確にし、液膜の破断現象と液滴の形成過程の関連性を明確にすることを研究目的の一つとした。

また、これとは別に壁面を流下する液膜の挙動解析にもこの方法を適用した。一般に、液膜表面に発生する波動と液体の流下速度は異なることが知られているが、様々な条件下(壁面角度や流下流量など)で、これらの速度がどのように変化するかを、本計測手法を用いて明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、上述の通り液体の微粒化現象の基礎として液膜噴流の表面に複数の着色点を作りそれらの相対的位置の変化から液膜の変形特性を調べることにした。また、傾斜壁面を流下する液膜表面に着色を行い、その流下速度を様々な条件で求めた。同時に表面波の移動速度を求め、それらを比較した。それぞれの具体的な実験方法を下記に述べる。

#### (1) 液膜噴流の変形と分裂過程の計測

図1に実験装置の概略を示す。実験装置は液体噴流を形成するためのノズルと、計測システムから構成されている。作動流体はフォ

トクロミック色素が溶解する灯油を使用した。フォトクロミック色素としては、1,3,3-trimethylindolino-6'-nitrobenzophrylospiranを用い、灯油に0.12wt%の割合で溶解させた。液膜を形成するために、図2のように壁面に噴流を衝突させることで液膜を形成した。図3に液膜とそれが分裂する様子を示す。

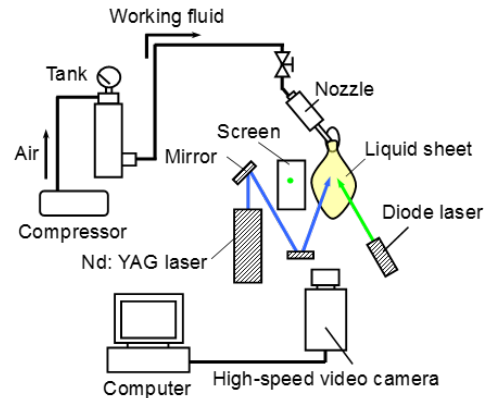


図1 液膜噴流の実験装置

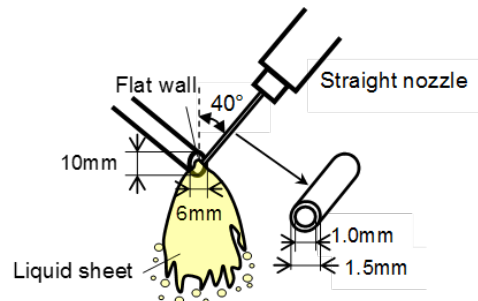


図2 液膜噴流の形成方法



図3 液膜噴流の様子

このような液膜にNd:YAGレーザーによる紫外光を照射した。紫外光を得るためにNd:YAGレーザーの第3高調波(波長355nm)をBBO結晶を用いて形成した。レーザー光はパルス光として照射した。パルス幅は約10nmで、照射のレーザーパワーは1パルスあたり約100mJである。

液膜上の着色された部分の移動速度を求めるために、高速ビデオを用いた。撮影速度は、5000fpsとし、各フレームの露光時間を1/20000秒とした。また、画像の解像度は384×512pixelである。

液膜上には図4のように4点の着色を行った。それぞれの点の移動量を、撮影間隔で割ることで、移動速度を求めた。さらに、4点の移動速度をもとに、4点を結び閉領域内の平均的な垂直ひずみ、せん断ひずみ、および、回転を求めた。これらの計算手法としては、4点を結び閉曲線上の速度成分を用いて、その線積分の値から、閉領域内の各量を計算する式を導出した。これらの値が液膜の流下方向にどのように変化して行くかを明らかにし、分裂に至るまでの液膜の挙動を調査した。なお、図中にあるようにダイオードレーザーを4点の中心に通し、吸収法によって液膜厚さの同時計測も行った。図5は、実際の液膜へ着色を行ったものの様子である。

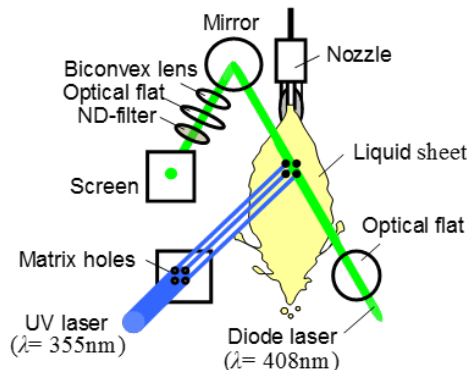


図4 液膜への照射パターン

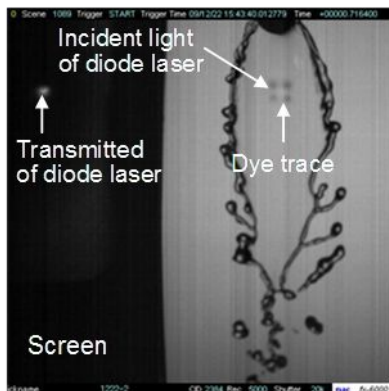


図5 液膜への着色の様子

(2) 傾斜壁面を流下する液膜流動の計測  
 上述の液膜噴流の挙動を解析する以外に、傾斜した液面上を流下する液膜の挙動も調べた。この実験では同時に流下液膜上に発生する表面波の移動速度も求め、両者を比較した。その実験装置の概略を図6に示す。

用いた流体は上記の液膜噴流の実験と同様に灯油とした。フォトクロミック色素も同様のものを用い、濃度も同様とした。また、レーザー照射系も同様のものを用いた。ただし、照射パターンは1点のみとし、その1点の着色位置の移動量から、液体表面の移動速度を割り出した。移動過程の記録は、30fpsのCCDカメラを用いて行った。

液体が流下する流路は、幅120mm、長さ300mmの透明アクリル製とした。また、傾斜角は水平から測って $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ に設定

した。また、レイノルズ数を次式で定義した。

$$Re = \rho Q / \eta b \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ は液体の密度、 $\mu$ は粘性係数、 $Q$ は流量、 $b$ は流路幅である。

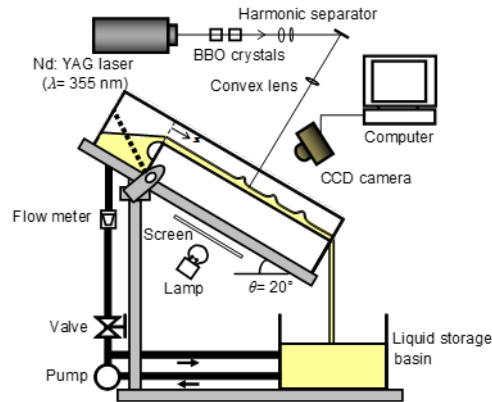


図6 流下液膜の実験装置

#### 4. 研究成果

##### (1) 液膜噴流の実験結果

図7は液膜の速度を求めた結果である。図の横軸は液体の壁面衝突位置からの距離である。分裂後の液滴速度も計測して連続的に示してある。この結果から、分裂後の速度は分裂前の速度に比べて若干低下していることが確認できる。この理由として、液膜が分裂時に表面張力の作用で収縮することで、上流方向に力を受けるためと推察される。

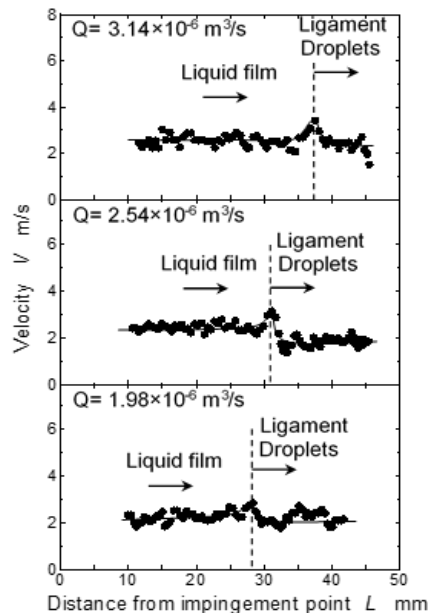


図7 液膜速度の変化

図8は $x, y, z$ 方向の垂直ひずみ $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ を表したもので、着色点からの伸び変形の積算値を示している。ここで、 $x$ 方向は鉛直下方向(流れの方向)で、 $y$ 方向は水平方向を表している。また、 $z$ 方向は液膜の厚み方向

を表している．この図からわかるように， $y$  方向（鉛直下向き）の垂直ひずみは徐々に増加する傾向にあることがわかる．これは，液膜が広がりながら分裂に至るためである．一方， $x$  方向の垂直ひずみについては，増加するものや減少するもの，あるいは，減少から増加に転ずるものなど様々な挙動を示している．高速ビデオの画像と比較した結果，4点の着色位置と分裂挙動の関係で，このような差が現れることがわかってきた．すなわち，液滴に分裂する前に，液膜には液体が集まった状態となる液系が形成される．4点がこの液系になる部分を跨ぐように着色された場合，垂直ひずみが減少し，逆に，着色点が液系と液系の間にある場合は，垂直ひずみが増加する．

$z$  方向の垂直ひずみは，連続の式をもとに， $x$  方向ひずみと  $y$  方向ひずみから算出している．したがって， $z$  方向の垂直ひずみは液膜の厚みに直接関係しているので， $x$  方向の垂直ひずみと逆の傾向で変化している．

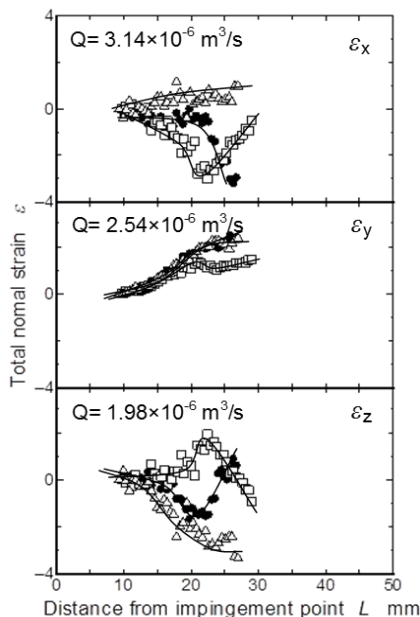


図8 液膜噴流の垂直ひずみ変化

図9はせん断ひずみの結果を示したものである．図に見られるようにせん断ひずみについても，増加する場合や減少する場合が見られた．これは図中の点で示したように，液膜に作用するせん断変形の向きによって決まるものである．このようなせん断的な変形が生じる原因としては，表面張力の効果によって液膜の外側にできるリムが影響を与えているものと推察される．

図10は回転運動を求めた結果である．この図から回転的な運動は液膜噴流には見られないことが確認できる．

以上のように，液膜噴流にフォトクロミック色素マーキング法を用いて，4点の着色を行うことで，その流れの変形特性を評価することが可能であり，これによって，液膜が分

裂に至る前にどのような変形過程をたどるかを把握することができた．

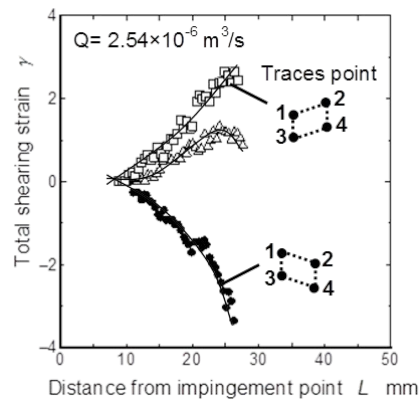


図9 液膜噴流のせん断ひずみ

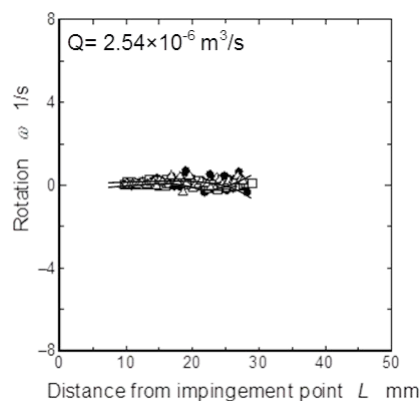


図10 液膜噴流の回転運動

## (2) 流下液膜の実験結果

次に傾斜した壁面を流下する液膜流の特性をフォトクロミック色素マーキング法によって調べた結果を示す．

図11は測定対象とした液膜流の可視化例である．流下方向に表面波が発生していることがわかる．ここで  $x$  は流路への流入口からの距離を表している．また， $Re$  は式(1)で定義したレイノルズ数である．このような表面波の発生している流れに，レーザー光を照射して，液体の表面に着色点を形成した．図12は着色の状況を示している．

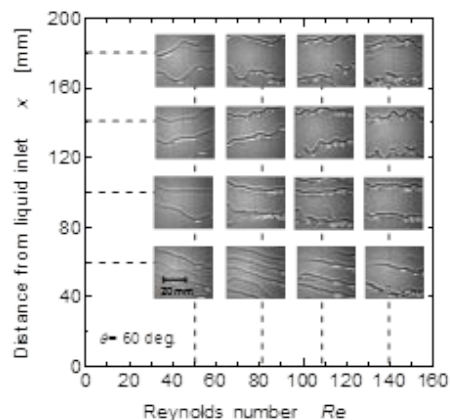


図11 流下液膜の表面波

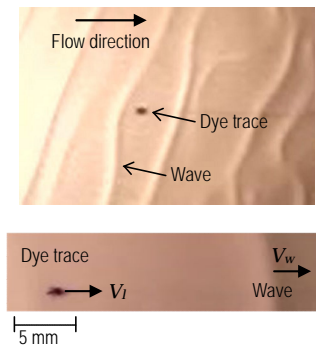


図 1 2 着色状況と表面波

図 1 3 は表面波と着色点の位置の変化をグラフ化したものである。この図より、表面波が着色点を追い越していることが確認できる。表面波が通過後に着色点が表面波に追従している様子が見られる。図 1 4 は図 1 3 からそれぞれの速度を求めた結果である。表面波の通過とともに、着色点の速度も増加している。表面波が通過してしばらくすると、着色点の速度も低下することも、確認できた。

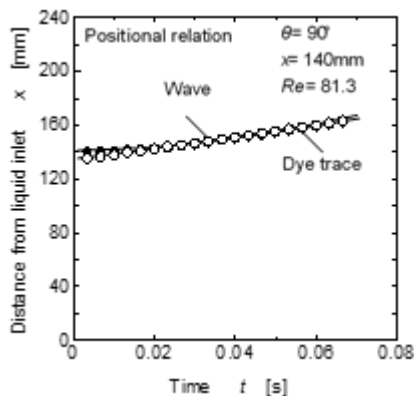


図 1 3 表面波と着色点位置の変化

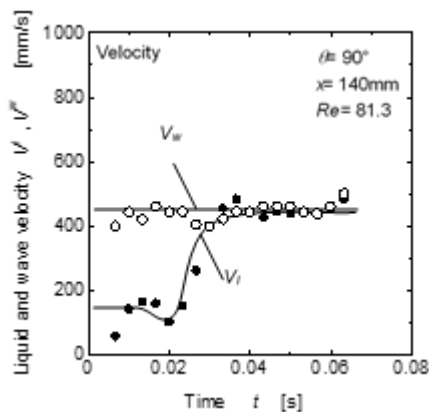


図 1 4 表面波速度と液体速度の変化

このようなことから、表面波と液膜表面の流下速度は同じではなく、表面波が液膜上を表面速度よりも速い速度で伝わっていることが明らかになった。

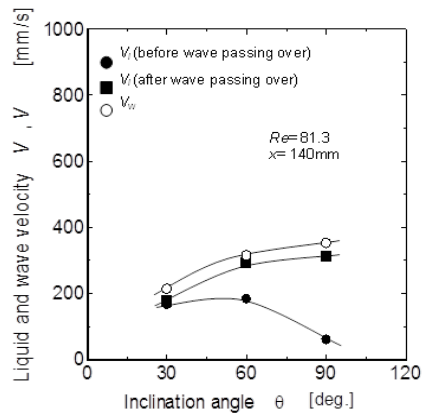


図 1 5 傾斜角の影響

図 1 5 は液膜の表面速度と表面波の速度に与える傾斜角の影響を調べた結果である。波の通過後の表面速度は表面波の速度にほぼ一致するような挙動を示した。

### (3) 研究成果のまとめ

フォトクロミック色素を溶解した流体に紫外レーザー光を照射して、流体自身に直接着色（マーキング）を行い、その移動量から流れの様子を調べる方法であるフォトクロミック色素マーキング法によって、液体の自由表面の変形挙動を調べる方法を提案した。実際の流れの例として、液膜噴流の流れと、斜面を流下する液膜の流動特性を解析した。

その結果、液膜の変形挙動として、垂直ひずみやせん断ひずみ、回転などの特性を定量的に把握できることを示すことができた。また、流下液膜における液体の表面速度と表面波の速度を同時に測定することができ、これらの間の関連を求めることができた。これらのことから、本研究で用いたフォトクロミック色素マーキング法が、自由表面の流動特性の把握に極めて有効であることが確認できた。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Nurrina Binti Rosli and Kenji Amagai, Simultaneous Measurement of Liquid Surface and Wave Velocity for Falling Liquid Films, Journal of Japanese Society for Experimental Mechanics, 査読有, Vol.14, Special Issue, s19-s24, 2014

Nurrina Binti Rosli and Kenji Amagai, Velocity and Deformation Measurement of Liquid Sheet using Laser Tagging Method by Photochromic Dye, Experiments in Fluids, 査読有, Vol.55, 1843(15pages), 2014, DOI:10.1007/s00348-014-1843-0

〔学会発表〕(計 1 件)

Nurrina Rosli and Kenji Amagai, Study of Liquid Film Flow Structure on Inclined Wall using Photochromic Dye Marking Method, 9<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, New Delhi, India, 1-6/Nov./2014

6 . 研究組織

(1)研究代表者

天谷 賢児 (AMAGAI, Kenji)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：20221731