

学 位 論 文 の 要 旨

Observation of Free Surface Flow Behavior Using Laser Tagging Method by Photochromic Dye Tracer

ヌリナ ビンティ ロスリ

氏 名 NURRINA BINTI ROSLI 印

Free surface flows are ubiquitous in our daily life and industrial fields. In response to the increasing demands to enhance the performance of equipment associated with free surface flows, study on the free surface flow behavior is greatly important. Since over half a century ago, various kinds of measurement method have been used to study the behavior of liquid flow such as particle image velocimetry (PIV). However, the PIV may not be reliable to deal with the study of free surface flow as it presents very large deformation on the liquid surface that cause difficulty to detect the flow signal. Therefore, a proper measurement method is highly needed.

Here, a laser tagging method by photochromic dye tracer is used to measure the free surface flow behavior. The technique is based on temporary color change of liquid containing a tracer called as photochromic dye with ultraviolet (UV) light exposure. From the movement of the dye trace tagged by the UV laser, the liquid velocity can be obtained. The merit of this method is that it allows the liquid flow being studied to be easily tagged by UV laser with our desired tagged pattern at any position on the liquid flow. Moreover, the measurement of liquid deformation and rotational motion (vorticity) can also be achieved from the change of relative position of the multiple dye traces formation. Therefore, the purpose of this research is set out as to study the behavior of free surface flow using the laser tagging method by photochromic dye tracer.

In this study, the calculation method was firstly arranged in order to measure the normal strain, shear strain and rotational motion of the liquid flow from the change of relative position of the dye traces. Normally, the error of deformation or rotational motion become large if the velocity distribution of flow field was given in space derivative. However in this study, evaluation of the liquid flow behavior was made without the large error by using an integration formula which was applied in the calculation method. It was realized by converting the line integral of closed curve that connecting the dye traces into surface integral.

Then, a preliminary experiment was conducted, i.e. a known flow field of creeping flow around a moving cylinder in order to confirm the applicability of laser tagging method for liquid flow measurement. As a result, the applicability was successfully confirmed from the good

agreement of present study with numerical results of creeping flow in previous literature.

Moreover, the method was applied to two kinds of free surface flow fields, i.e. liquid sheet spray and liquid film flow on inclined wall. For the liquid sheet spray experiment, the method was utilized to fundamentally study the atomization process of liquid jet from the liquid film until disintegrated into ligament and droplets. Especially in this experiment, besides the measurement of liquid film velocity, the change of relative position of 4-points of dye traces tagged in the liquid film surface also allowed the measurement of deformation behavior and rotational motion. As a result, the velocity of droplets after break up was found to become lower than velocity of liquid film before break up. This can be attributed to the effects of surface tension during disintegration of liquid into droplets. Moreover, the liquid in mainstream region was also found as majorly pulled into perpendicular direction and almost no rotational motion occurred in the liquid flow behavior.

For the experiment of liquid film flow, the laser tagging method was utilized to clarify the liquid film flow delivered on an inclined wall. Simultaneously, the velocity of surface wave on the liquid film surface was also measured and compared to the liquid film surface velocity. Generally, the velocity of liquid film and surface wave are not consistent. The relationship between liquid film and surface wave velocity affected by wall inclination angle and liquid flow rates was clarified experimentally in this study. As a result, the velocity of surface wave was found as larger than liquid film velocity. The velocity of liquid film became larger when wave peak passed on the liquid film. From the change of dye trace diameter, the inner flow structure of liquid film upon redundant with surface wave was observed. Here, the free surface flow tended to be attracted when approached by surface wave. Thereafter, the liquid film was then found to shrink its surface after the wave peak passed by due to accumulation into the inner liquid.

As a conclusion, by directly tagging the liquid at its free surface, the behavior of flow being tagged can be analyzed in detail. Especially from the formation of multiple dye traces on the liquid surface, the measurement of deformation in normal strain, shear strain, and rotational motion behavior was successfully achieved. Therefore, the measurement of free surface flow was finally realized by using the laser tagging method by photochromic dye tracer.

学位論文の要旨

フォトクロミック色素トレーサによるレーザータッキング法を用いた自由表面流れ挙動の観察

ヌリナ ビンティ ロスリ
氏名 NURRINA BINTI ROSLI 印

液体の自由表面を伴う流れは、我々の日常生活や産業分野でしばしば観察される。この自由表面流れが関係する機器の性能を改善するために、様々な自由表面流れに関する研究が進められてきた。例えば、半世紀以上前から、流体中に分散させた散乱微粒子の動きから、流れを計測する粒子画像速度測定 (PIV) のような計測法が幅広く応用されてきた。しかしながら、一般に自由表面流れは、大きな変形が起こることから、粒子画像速度測定では流れの信号を検出することが難しくなり、何らかの新しい計測法の確立が必要である。

本研究では自由表面流れの観察を目的としてレーザータッキング法を用いることにした。この計測法は流体中にフォトクロミック色素を含有させ、そこに紫外光レーザーを照射することで液体の一部を着色し、その移動量から流れの速度を求める方法である。また、この方法の利点の一つとして、任意の着色パターンを容易に流体に付けることが可能になり、測定したい部分の流れの様子を観察することができる。さらに、複数の着色点の相対的な位置の変化から、自由表面流れの変形や回転運動も求めることが可能になる。

本研究では、初めに複数の着色点の相対的な位置変化から流れ場の伸び変形やせん断ひずみ変形、および、回転運動 (渦度) を求めるための数学的な方法を整理した。特に、これらの変形や回転は流れ場の速度分布の空間微分で与えられることから、通常は大きな誤差を伴うが、本研究では、着色点を結ぶ閉曲線の線積分から、積分公式を用いて面積分に変換し、大きな測定誤差を含まない形で評価できるように工夫を行った。

次に、この計測法の流れ計測への適用性を確認するために、流れ場がよく知られている円柱周りの流れを測定する予備実験を行った。その結果、従来の円柱周りの流れの実験結果と一致することが確認でき、これによってレーザータッキング法が流れの計測法として適用可能であることが確認できた。

さらに、このレーザータギング法を用いて、液膜噴流の流動や斜面上を流下する液膜流れの観察も行った。液膜噴流の実験では、液体の微粒化プロセスの基本特性を明らかにする目的で、液膜が変形し液糸および液滴に崩壊するまでの過程をレーザータギング法を用いて観察した。特に、液膜上に4点の着色を行い、その移動量から液膜の速度を求めたほか、4カ所の着色点の相対的な位置関係の変化から、液膜の変形挙動や回転運動を計測した。その結果、液膜流れでは、液膜部分よりも分裂後の液滴流の速度が減少することが確認できた。これは分裂時の表面張力の効果によるものと考えられる。また、液膜の流動は主に流れと直角方向への引き伸ばし効果が大きく、回転的な運動はほとんど見られないことがわかった。

斜面上を流下する液膜流れの観察では、レーザータギング法を用いて自由表面の液体の流下速度を計測した。これと同時に液膜上に発生する表面波の波速も求め両者を比較した。一般に、液膜の流下速度と波速は一致しないと考えられるが、本研究ではそれらを同時計測し、斜面の角度や流量などによって、液膜の速度と波速の関係がどのように変化するかを実験的に明らかにした。その結果、液膜の流下速度に比べて波速は早く、波の頭部が通過することで、液膜の流下速度も増加することが観察された。また、着色点の大きさの変化から、波の通過時に見られる液膜流の内側構造を考察し、波が近づいてくる場合は自由表面が引き伸ばされる傾向があり、逆に波の頭部が通過すると液体の表面が縮小され、液体中に引き込まれるような現象が見られることがわかった。

以上のように、本研究で用いたレーザータギング法によって、液体の自由表面に直接着色することで、その部分の流れの状態を詳細に解析できること、特に、複数の着色パターンから、流れ場の伸びやせん断ひずみなどの変形挙動、渦度などの回転運動が計測できることを示した。このように本研究では、レーザータギング法が、これまでは計測が比較的難しかった自由表面流れの流動特性や変形特性の解析に、極めて有効であることを示すことができた。