A103

フォトブリーチンク分子タグ法による速度・速度勾配の同時計測*

細川 茂雄[○](神戸大学), 赤川 純一(神戸大学), 富山 明男(神戸大学)

Simultaneous measurement of velocity and velocity gradient using photobleaching molecular tagging velocimetry

Shigeo HOSOKAWA, Junichi AKAGAWA and Akio TOMIYAMA

ABSTRACT

To measure local instantaneous velocity and velocity gradients, a molecular tagging velocimetry based on photobleaching reaction was developed in this study. The photobleaching is an irreversible photodegradation of a fluorescent dye, and therefore the velocity and its gradient can be measured from the translation and deformation of photobleached tag, respectively. The method was applied to a laminar pipe flow, laminar suction flow, and a turbulent flow in a square duct. It was confirmed that the method can accurately measure radial distributions of liquid velocity and shear stress in the pipe flow and that the method is applicable to turbulent flows.

Keywords: Molecular tagging velocimetry, Photobleaching, Velocity gradient

1. 緒 論

NS 方程式は速度勾配を含み、乱れエネルギー方程式等は瞬時・局所速度勾配の相関項が現れる。多くの場合、速度勾配相関項をモデル化する必要があるが、瞬時・局所速度勾配を計測する手法が少なく、モデルの構築、検証を妨げる一因となっている。

そこで、本研究では分子タグ法に着目し、タグの並進運動およびその変形量から瞬時・局所における速度・速度勾配を同時測定する手法を開発した。また、本手法を層流吸い込み流れに適用し誤差評価するとともに、ダクト内乱流に適用し乱れの生成と消散の評価を試みた。

2. 計測手法

計測装置の概略図を Fig.1 に示す。本研究では Uranine の Photobleaching 反応を利用してタグを形成した。Uranine は蛍光物質であるが Photobleaching 反応を起こすと蛍光を発しなくなる。従って、強いビーム ($\lambda=488.0\text{nm}$) で Photobleaching 反応を誘起した後、弱いレーザシート ($\lambda=514.5\text{nm}$) を照射すると、Photobleaching 反応を起こした領域が蛍光を発しない領域として可視化できる。形成したタグを 2 時刻で撮影し、タグの重心座標の移動距離から流速を、タグ形状の時間変化から速度勾配を評価する¹⁾。速度勾配評価手法の概略図を Fig.2 に示す。タグ中の任意点の時間 δt における移動量 δR は、流体の速度 v と位置ベクトル r を用いて次式で表わされる。

$$\delta R = v\delta t = \left(v_0 + \frac{\partial v}{\partial r} \cdot \delta r \right) \delta t \quad (1)$$

ここで、タグ内で速度勾配テンソルが一定、かつ流れが 2 次元と見なせると仮定すると次式が得られる。

$$\delta R = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} \delta t \quad (2)$$

ここで、 a_{ij} は速度勾配テンソルの各成分である。ここで、 a_{ij} をある値と仮定し、時刻 $t=0$ において測定したタグ領域を式(2)を用いて変形させ、時刻 $t=\delta t$ のタグ領域との相関をとれば、仮定した a_{ij} の値の妥当性を評価できる。従って、 a_{ij} をある範囲で変化させて相関値を計算し、相関値が最大となる a_{ij} を見つけることにより、測定したタグ変形に見合う速度勾配テンソルが評価できる。

Fig.1 Schematic of measurement system

Fig. 2 Schematic of cross-correlation of tag shapes

3. 実験結果および考察

3.1 検証実験

速度および速度勾配テンソルの測定精度を評価するため、矩形容器からの層流吸い込み流れを対象として本計測法による測定および数値解析を行った。実験装置の概略を Fig.3 に示す。容器のサイズは幅 110mm、高さ 140mm、奥行き 40mm であり、容器中央部から幅 4mm 奥行き 40mm の矩形ノズルで容器内の水を吸い出す。測定領域は、ノズル近傍 8mmX8mm であり、この領域内にタグを 25 点 (5X5) 形成し、速度および速度勾配を測定した。数値解析は、2 次元非圧縮粘性流体と仮定して実験と同じ体系で計算した。

Fig.4 に示すように、計測結果と計算結果は良好に一致しており、本手法により速度および速度勾配を正確に評価できることを確認した。図中の誤差棒は、画像の 2pixel に対応する誤差を示しており、本手法の速度および速度勾配評価誤差が 2pixel 以内であることがわかる。本手法の誤差要因は、主に画像解像度であり、その向上により誤差はさらに低減できる。

3.2 乱流場への適用

本手法の乱流場への適用性を調べるため、矩形ダクト (50mmX50mm) 内乱流場に適用した。流体には水を使用し、レイノルズ数は 3000 である。各測定点において 50 個のタグを測定して求めた平均軸方向速度 $\bar{U}$ および RMS 値 u'^2 を Fig. 5 に示す。ここで、 y は壁からの距離、 W はダクト幅である。また、比較のため LDV 計測結果

Fig. 3 Experimental apparatus for laminar suction flow

Fig. 4 Comparison between measured and simulated velocity and velocity gradients

(サンプル数 30,000) も同図に示している。図より、本手法の計測値は、サンプル数が少ないにも関わらず、LDV の計測値と良好に一致しており、乱流場においても正確な測定が可能であることが確認できる。さらに、本手法では壁面から 70μm ($y^+ \sim 2$) まで計測可能であることを確認した。

本計測法では、2 次元ではあるが瞬時・局所速度勾配が計測できるため、速度勾配の関連項の評価が可能となる。そこで、乱れの生成項 P および散逸項 ε を、Laufer²⁾, Hinze³⁾ の仮定を参考にして次式で近似し、測定値を代入した結果を Fig.6 に示す。

$$P = \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \frac{5}{4} \overline{v'v'} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2} + \frac{9}{2} \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial y} \right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial v'}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right)^2} \quad (4)$$

P と ε はおおよそバランスしており、従来知見³⁾ と一致する。

以上より、本手法は流れ場内の速度および速度勾配を精度良く測定可能であり、また速度勾配関連項などの評価に有益であることが確認できた。

Fig. 5 Measured axial velocity and RMS.

Fig. 6 Evaluated turbulence production and dissipation

参考文献

- 1) Hosokawa, S. and Tomiyama, A., Multiphase Science and Technology, Vol. 16, No. 4, pp. 365-383 (2004).
- 2) Laufer, J., The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow, NACA Report No. 1174 (1954).
- 3) Hinze, J.O., Turbulence, McGraw-Hill (1975).