感温液晶擬似カラー画像の構築と温度・速度計測の不確かさ解析

Artificial Color Images for Temperature Sensitive Liquid Crystal Particles

and Uncertainty Analysis in Temperature and Velocity Measurement

○学 橋爪勇嗣(新潟大), 正 藤沢延行(新潟大), 土屋敏明(計算流体研)

Yuji HASHIDUME, Nobuyuki FUJISAWA Niigata University, 8050 Ikarashi 2, Niigata, Japan

Toshiaki TSUCHIYA, Institute of Computational Fluid Dynamics

The artificial color images for visualizing the liquid crystal particles suspended in a thermal fluid have been constructed based on the numerical simulation data of thermal convection. The color of the images reflects the experimental relationship of color to temperatures of liquid crystals. Using this artificial color images, the effect of various experimental parameters for analyzing the temperature and velocity is studied. The results indicate some useful conclusions about the optimum selection of experimental parameters for high accuracy measurement of temperature and velocity.

Keywords: Flow visualization, Temperature, Liquid crystal, Artificial color image, PIV, Accuracy

1. 緒言

最近、マイクロカプセル化した感温液晶粒子を用いた温度・速度の同時計測法が注目されている。この計測法は、白色光を照射したときの感温液晶の色が流体温度に依存することで温度を計測し、同時に液晶粒子をトレーサとして見做し、PIV法を適用することで速度も同時に計測する方法である。これまでに、温度・速度の同時計測法の適用例がいくつか報告されているが、温度・速度の計測精度に及ぼすパラメータの選定については明らかにされていない。Okamotoら⁽¹⁾は、PIV法の標準化のために、数値計算結果を用いて標準画像を構築した。この画像は、PIV法に含まれる各種パラメータの最適化ならびに不確かさ解析にも利用可能であり、計測上有効な手段を提供する。

本研究では、感温液晶を用いた温度・速度の同時計測法における最適パラメータの探索を目的として、擬似カラー画像の構築を行い、また、誤差最小の条件から最適パラメータの組み合わせについて検討する。

2. 擬似カラー画像の構築

図1は、擬似カラー画像の構築に用いた温度・速度の数値シミュレーション結果である。ただし、温度境界条件は、下面加熱、上面冷却の条件で、レイレー数 Ra は、 $Ra=1.06 \times 10^6$ である。図によると、下面から発生した高温流が上昇し、同時に上面から低温流が下降する様子が観測される。一方、ここで対象とする温度・速度場は、既報⁽²⁾の温度・速度の同時計測実験条件に習い、平均粒径 $10 \mu m$ の感温液晶粒子が厚さ $5mm$ 、面積 $60mm \times 60mm$ の水中の可視化断面内に重量濃度 0.004% 添加された場合である。このとき、CCDカメラで 512×512 の空間解像度の画像を撮影したとすると、感温液晶粒子径は 0.04 画素となり、1画素に約10個の粒子が入っていることになる。したがって、トレーサ粒子径はサブピクセルオーダーであり、相互相関解析に基づくPIV計測では、トレーサ群の示す粒子濃度を追跡することで速度計測が行われることになる。このようなサブピクセルオーダーの粒子の擬似画像を作成するため、 10^6 個のトレーサ粒子を乱数を用いて各画素に分割し、粒子数に比例した輝度を与えた。なお、ライトシートの厚さ方向の輝度分布は、ガウス分布に従うと仮定して扱った。一方、温度による感温液晶の色変化は、既報の実験結果を用いた。図2は、供試感温液晶の呈色をHIS色空間で表し、それらが温度 T とともに変化する関係である。擬似画像作成においては、この実験的關係を一旦RGBに変換した後、粒子の含まれる各画

素に色情報を与えた。

3. 結果および考察

3.1 擬似カラー画像 図3は、以上の方法によって作成した擬似カラー画像の構築例である。図2の温度分布に対応して、低温から高温に変化するに伴い、画像は赤から緑、そして青へと変化する事がわかる。また、擬似カラー画像には画素ごとの輝度変化が認められるが、これは画像作成にあたって輝度が粒子数に比例すると仮定したために生じたものである。なお、同様な輝度変化は、実際の感温液晶による可視化画像においても認められる。

3.1 評価パラメータの最適化 温度・速度の解析結果をそれらの真値と比較することで、評価パラメータの最適化を考察した。図4および図5は、PIV解析における相関値 $CR-U$ 、 $CR-V$ ならびに誤差 Err の値が相関領域サイズ(図4)および探索領域サイズによって変化する関係である。なお、ここでは、速度場解析法として輝度差累積法を用いた。ただし、解析結果と真値との相関を示す $CR-U$ 、 $CR-V$ ならびに誤差 Err は次式で定義される。

$$CR-U = \frac{\sum_{i=1}^M (U_i - \bar{U})(U_i^* - \bar{U}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (U_i - \bar{U})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M (U_i^* - \bar{U}^*)^2}} \quad \dots(1)$$

$$CR-V = \frac{\sum_{i=1}^M (V_i - \bar{V})(V_i^* - \bar{V}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (V_i - \bar{V})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M (V_i^* - \bar{V}^*)^2}} \quad \dots(2)$$

$$Err = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\sqrt{(U_i - U_i^*)^2 + (V_i - V_i^*)^2}}{\sqrt{U_i^2 + V_i^2}} \quad \dots(3)$$

ここに、 U, V はそれぞれ水平ならびに垂直方向の速度成分を表し、 U^*, V^* は真の速度を表す。また、 $\bar{U}, \bar{V}, \bar{U}^*, \bar{V}^*$ はそれぞれ U, V, U^*, V^* の平均値を示し、 M はベクトル数である。これらの結果によると、相関領域を大きくすると誤差が減少し、探索領域を大きくすると誤差が大きくなる傾向がある。誤差最小の条件は、相関領域サイズ40、探索領域サイズ15のとき得られる。

図4は、最適パラメータにおける温度・速度の解析例である。ただし、温度解析には、スプライン検定法を用いた。本結果は、図1の結果と良く一致しており、温度・速度場

が良好に再現されていることがわかる。

4. 結言

熱対流の数値シミュレーション結果と感温液晶の色・温度の実験的關係に基いて、擬似カラー画像を構築する方法を示した。また、それを用いて温度・速度の同時計測に及ぼす評価パラメータの最適化を行った。

本研究を進めるにあたり、諸角鍍金（有）諸角義二氏より研究助成を頂いた。ここに、感謝申し上げる。

Fig.1 Velocity and temperature of simulation data.

Fig.3 Example of artificial visualized image.

Fig.5 The effect of search window size.

参考文献

- (1) Okamoto, K. et al., Proc. 2nd Int. Workshop PIV'97, Fukui, 1997, pp. 21-32.
- (2) Fujisawa, N. and Funatani, S., Proc. 3rd Int. Workshop PIV'99, Santa Barbara, 1999, pp. 607-612.
- (3) Hu, H. et al., Journal of Visualization, 1-1(1998), pp. 87-94.

Fig.2 Optical characteristics of liquid crystal.

Fig.4 The effect of interrogation window size.

Fig.6 Analyzed velocity and temperature.
(For caption see Fig.2)