B208 カラー画像解析による温度・速度の同時計測 —その1: 感温液晶を用いた温度計測—

東大生研 小林敏雄、佐賀徹雄、瀬川茂樹。

東京電力 田中俊彦

Simultaneous measurements of temperature and velocity field
in the thermal flows through a color image processing.
1st Report : Temperature measurements using micro capsuled
thermo-sensing liquid crystals

Toshio. Kobayashi*, Tetsuo. Saga*, Shigeki. Segawa* and Toshihiko. Tanaka**

The Visualization technique using micro capsuled thermo-sensing liquid crystals (TLC) suspension method can be obtained to the information both temperature and velocity, simultaneously. It is, however, not so easy to apply its technique to the quantitative measurement. This paper presents a procedure to determine the instantaneous isothermal temperature distributions in a time-varying thermal flow field visualized by the TLC tracer particles. Liquid crystal video images photographed by a 3-CCD camera are digitized into three frames concerning the intensities of red, green and blue light. These three RGB images are filtrated by the weighted averaging method. By using Munsell color system, the relations between colors and temperatures are calibrated. This color image processing technique has been applied to the unsteady thermal flow field, and two dimensional isothermal temperature distributions were successfully measured.

1: まえがき

最近、マイクロカプセル化した感温液晶をトレーサとする可視化手法が非定常な熱流動現象の解析に多用され始めている^{(1),(2)}。この可視化手法は温度計測範囲に制限があるものの、原理的に点計測である熱電対や熱線流速計等とは異なり、瞬間的、空間的な温度分布を色情報として得ることができる特徴を持っている。しかも液晶トレーサ粒子の動きを解析することにより流れ場に複合する温度と速度を同時に計測できる可能性があり熱流体の計測に対する有効な手法としてその定量化が期待されている。本研究では、まずその第一段階として非定常な熱流動現象をマイクロカプセル化した液晶粒子で可視化し、その画像の色情報をデジタル画像処理技術を用いて空間的な温度分布へと定量的に変換することを試みた。過度的に温度が変化する流れ場を液晶トレーサ粒子により可視化し、3板式のCCDカメラでカラー撮影する。得られたカラー入力画像にノイズ処理、平均化処理などを施した後、自動的に温度と色彩の関係を決定し瞬時の空間的な温度分布を計測するアルゴリズムを構築した。平板上の変動する温度分布の計測および平行平板間の非定常温度計測に本画像処理を適用したので報告する。

Fig.1 Experimental apparatus

* Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo ** Engineering Research Center, Tokyo Electric Power Co.
7-22-1 Roppongi, Minato-Ku, Tokyo 2-4-1 Nishi-Tsutsujigaoka, Chofu-shi, Tokyo

2: 実験方法

図1に本実験に用いた可視化水槽(150mm(w)×180mm(h)×20mm(d))と可視化方法の概略を示す。アクリル製の可視化水槽は観測窓とスリット光を照射する側面の一部(5mm(d)×80mm(h))を除き黒色の無反射シートで覆い観測窓からの散乱光以外の光を遮断した。この可視化水槽とTVカメラは暗室内に設置されている。また観測窓と反対側の面に垂直方向に3mm間隔で10個の熱電対(Type-K)を設置した。左右の側面から平行冷光線(ハロゲンランプ、幅5mm)を照射し、直行する観測窓から3板式CCDカラーカメラ(ソニー製、DIC-3000A)で撮影した。照射光と撮影カメラの角度は一連の実験を通じて90度の一定角度に保たれた。TVカメラからのR、G、B出力信号は各々8ビットでA/D変換され画像処理装置(Nexus6400)へ直接入力して入力画像の3原色(R、G、B)成分を得た。なお単板式のCCDカメラを使用しE/D変換器を通してR、G、B3成分を分離する方法を各種試みたが、S/N比が悪くなること、あるいはR、G、Bの色分離が悪いなどの理由により本手法には不適当と判断し採用しなかった。本実験に用いた液晶粒子(KR-30)は平均粒子径20 μ mで比重が1.02である。マイクロカプセル化した液晶粒子を用いた可視化では、鮮明な色彩が観察されることがや液晶の光学的な性質が変化しにくいこと等の理由で作動流体として一般的にシリコンオイルが用いられてる。しかし本実験ではより実用的な温度計測を考慮して水を作動流体とする実験を行った。液晶粒子の懸濁濃度は、予備的に0.001%から0.3%まで変化させた結果、S/N比の良好な0.05%に固定して実験を行った。

3: カラー画像解析による温度解析

まず、温度と色彩の関係を校正するための実験を行った。可視化水槽を恒温水槽に設置し、約50℃に加熱した液晶懸濁水溶液を可視化水槽中に入れ十分攪拌することにより一様な温度分布を形成した。つぎに、下部の恒温水槽に10℃の冷水を注入し液晶懸濁液に温度勾配を与えた。図2に可視化水槽の測定領域(65mm×60mm)の温度勾配を示す。横軸は温度を、縦軸は熱電対の鉛直方向の位置を示す。図中黒丸は各熱電対位置における平均温度を横線は計測器の分解能を示す。水槽内の温度分布は鉛直方向にほぼ直線的に変化していることがわかる。なお水平方向の温度分布はほぼ一様であった。使用した液晶粒子の色彩は高温側から青、緑、黄、赤であった。TVカメラから画像処理装置へ入力されたR、G、Bの3成分はマイクロコンピュータ(PC9801vx)に転送されカラー画像に対する各種の計算が行われた。画像の分解能は0.1mm²/画素である。まず、R、G、B各画像についてA/D変換や量子化に伴う雑音を消去するために中間値フィルタと空間フィルタによる局所的な平均化処理を行った後、各画素の色度をR、G、Bの3成分の合計値で正規化し色度値(r、g、b)を求めた。水槽上下方向の温度が約29℃から31℃の付近に位置する各画素のrgb色度値を図3に示す。図中横軸に温度(T)、縦軸に色度値を示す。

Fig.2 Temperature distribution in test section

図より 29.4°C から 29.9°C の領域で r 、 g 、 b の何れかの色度値が変化しそれ以外の領域では変化していないことがわかる。図 4 に同温度領域の $x-y$ 色度座標を示す。図中白丸は 0.1°C 間隔の温度を示している。標準白色光の位置を示す w 点からの偏角で色相値 (H) を求め、熱電対で測定した温度分布との対比により温度 (T) との関係を決めた^{(3)・(4)}。図 5 に温度と色相の関係を示す。 29.4°C から 29.9°C の範囲で温度と色相はほぼ直線的に変化していることがわかる。 $H-T$ 曲線において g と r あるいは b の 2 つ以上の色度値が同時に変化している場合ほぼ直線的に温度と色度の関係が定式化できる。そこで色度値 g に着目し、温度の計測範囲を g の最大値からの比 K ($K = g / g_{\max}$) により決定した。図 6 に K と H の関係を示す。横軸に温度、縦軸に色相、パラメータ K を図中に示す。例えば $k > 0.5$ とした場合は約 29.6°C から約 29.8°C の範囲で色相により温度が決定される。 K は温度の計測範囲に関係し K を大きくすると計測範囲が狭くなり、小さくとりすぎると H が飽和して温度が決定できない。本研究では温度計測範囲を $K > 0.02$ に選択し色相と温度の関係を定式化した。

4: 実験と考察

上述のカラー画像解析手法を用いた温度計測 2 例を以下に示す。

4-1: 平板上温度分布の解析

100mm 角の厚さ 2mm のジュラルミン製平板に無反射用黒色塗装を施しその上から液晶を厚さ $40\mu\text{m}$ で一様に塗布する。裏面の 1 点を温度約 300°C で急加熱し熱源からの温度の伝播状態を表面の液晶膜により可視化した。供試板と平行な方向から冷光光線を照射し直角方向から TV カメラで撮影を行った。再生画像を図 7 に示す。図中 $\times$ 印が熱源位置で白線で囲んだ $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ の領域で測定を行った。加熱後約 10 秒の測定結果を温度の等値曲線として図 8 に示す。図中もっとも内側の等値線が 29.9°C で最も外側のそれが 29.4°C を示す。この間の温度が使用した液晶粒子での計測範囲である。

4-2: 水槽内温度解析

校正実験に用いた可視化水槽に鉛直方向に直線的な温度勾配を持ち水平方向に一様な温度分布を持つ温度成層を作る。液晶の発色領域が観測窓の中央部付近にきたときに水槽上部より約 10°C の冷水を勢よく注入して温度成層を乱し、この状態を

Fig.3 Chromaticities of rgb

Fig.4 X-Y Chromaticity

Fig.5 Hue versus temperature

Fig.6 Determination of measurement region using K

TVカメラで連続的に撮影する。図9にある瞬間の再生画像を示す。図中白線で囲んだ30mm×30mmの部分で測定領域である。測定結果を温度の等値曲線として図10に示す。測定領域の中央部付近の温度勾配が、注入した冷水により大きく乱されている状態が明瞭に計測されている。なお図8、10の等温度線は測定領域を60×60の格子に分割し格子点上の温度を周囲25画素の温度から求め、この格子点温度をもとに推定したものである。

5: まとめ

マイクロカプセル化した水分散用感温液晶粒子を用い熱流動現象の自動温度計測を行い以下の結論を得た。

- (1) 水溶液中に懸濁した水分散用感温マイクロカプセル液晶の色彩の変化を捕らえ、色相の偏角により色・温度の定式化を行った。
- (2) 計測可能な温度範囲はrgb色度値と密接な関係があり、色度値gがその最大値の2%以上の値を持つ画素については定量的な温度計測が可能であることを示した。
- (5) 本カラー画像解析手法を過渡的に変化する温度場に適用し良好な結果を得た。

本報告では発色温度範囲が29℃から31℃と比較的狭い液晶を使用して色-温度の定式化を試みた。今後は、本手法を広い発色帯域を持つ液晶に適用するとともに、液晶粒子径、照明光源、観測角度あるいは画像入力機器の特性などの温度計測に関係する諸因子の影響を明らかにする予定である。同時に液晶粒子の温度に対する応答性を明らかにし、温度、速度の同時計測の可能性を検討していく予定である。

- 1) 椎名ほか1名、機論(B)、55-518(1989)、pp3129
- 2) T. Tanaka, 2nd-FLUCOME'88(1988)、pp212
- 3) 池田光男、色彩光学の基礎、朝倉書店(1989)
- 4) I. Kimura, ASME, FED-Vol. 85(1989)、pp69

Fig. 7 Temperature distribution on the flat plate visualized by liquid crystal sheet

Fig. 8 Isothermal temperature contour lines on the flat plate

Fig. 9 Temperature distribution in the parallel channel visualized by tracer particles of liquid crystals

Fig. 10 Isothermal temperature contour lines in the parallel channel