論文

感温液晶を用いた温度計測の角度による 補正と測定幅の拡大について*

波田 貞之**, 亀岡 利行***

Expansion of Thermally Sensitive Range Using Two Different Density Liquid Crystal in Cooperation of Observation Angle Modification

Sadayuki HATA and Toshiyuki KAMEOKA

ABSTRACT

Thermo-sensitive liquid crystal display thermal distribution as it changes color according to temperature. By using the developed color image processing technique, spatial thermal information can be obtained. However, modification of the relation between color and temperature is necessary, because the color also depends on an observation angle. The modification is made possible by observing color distribution in the constant temperature field. Liquid crystal is in general inappropriate for measuring a wide thermal range, because its thermo-sensitive range is relatively narrow. Authors expanded this approach to measurement of a wider temperature range using two mixed ratios of liquid crystal with different thermo-sensitive ranges. Applying this approach, thermal plume in a natural convection field is successfully examined.

Key words : Liquid crystal, Image processing, Temperature measurement, Natural convection

1. 緒言

熱交換器や原子炉などにおける伝熱現象を解明するためには、複雑な流れがあるため実験的な研究が行われている。その熱流動現象を理解するために、空間内全体の温度場を計測する必要がある。主にこの場合は、熱電対を大量に測定面に取り付けて行っているが、この温度測定は流体中に測温体を入れるため、測定面を乱したり、測定導線から熱の流入出があり温度分布へ影響を与えるなどの問題点がある。それに対し、感温液晶懸濁法は、感温液晶粒子(直径 $20\mu\text{m}$ 程度の球形, 比重 $1.01\sim 1.03$) 1つ1つが温度により色の変化を示すので無数の測定点が得られ、微粒子のため流れを乱さず、実験対象の温度分布や挙動の可視化画像が得られる。可視化画像をカラー画像処理を行い色情報を温度情報に換算することで、空間全体の多点温度測定が可能である^{1)~3)}。

感温液晶の呈色は温度による変化だけでなく、光の入射角度によっても変化する。この測定法は可視化画像の色情報を温度に換算しているため、観測角度による色の変化で誤差が発生する。正確な温度を測定するには、

色情報と温度情報の他に観測角度の情報を加える必要がある。従来の方法⁴⁾ではシート光の角度を変える手法により、観測角度における感温液晶の色の変化を求めている。そのため、その方法は特別な装置が必要になったり、観測角度ごとに校正実験を行うため、非常に手間の掛かる作業であった。そこで、本報告では簡単に観測角度の情報を加えるために、画像における画素の座標と観測角度の関係を予め求めておいて、観測角度により呈色データを補正する方法を提案する。

感温液晶の呈色する温度幅は狭く、温度測定に利用できる範囲は狭い。呈色する温度幅の全体を利用するために、ニューラルネットワークを用いて温度測定する研究が報告されている³⁾。しかし、この温度計測では1つの感温液晶を用いるため、感温液晶の呈色する温度幅に限界があり、温度測定できる幅はあまり大きくできない。そこで、本報告では呈色温度が異なる2つの感温液晶をシリコン油に濃度を変えて懸濁し、両者を明度の差で識別して、各々の呈色範囲を利用することで、広い範囲で温度測定する方法を試みる。また、感温液晶を用いた温度計測では感温液晶の粒子をトレーサとして温度と速度の同時計測を行っている²⁾。本報告において、加熱体からの自然対流場の温度分布の解析とともに速度場の解析も行う。

* 原稿受付 1998年3月9日

** 学生会員 東京電機大学大学院〔現・日本製紙㈱〕

*** 正会員 東京電機大学

2. 可視化実験装置と温度換算方法

Fig. 1 に、本研究で用いた実験装置の概要を示す。厚さ 10 mm の透明アクリル板で作られた油槽 ($160 \times 165 \times 120 \text{ mm}^3$) には、作動流体であるシリコン油 (信越化学工業製 KF-56, 比重 0.99 25°C) を入れ、感温液晶を懸濁した。空調により実験室内を一定温度に保ち、同様のアクリル板で作られた水槽 ($300 \times 210 \times 300 \text{ mm}^3$) は、恒温水槽から一定温度の水を循環させ、油槽内の温度を初期設定する。暗室内において油槽にシート光 (ハロゲンランプ 1,000 W 幅 5 mm) を照射することで、二次元的に可視化温度場が感温液晶の色彩で示される。可視化された面の温度は熱電対で測定する。可視化画像は CCD カメラ (sony CCDVX 1 3 CCD) で撮影し、画像処理装置 (画素数 640×480) のメモリーに格納し、計算機 (PC-9801 BX) に記憶する。温度分布と速度分布は、記憶された画像を計算機 (CPU Pentium 90 MHz, Memory 40 MB) に移動して、それぞれの値を計算する。温度測定は感温液晶の色を認識して温度換算するが、色情報には色の種類を示す色相を用いた⁴⁾。温度分布は可視化画像の R (赤), G (緑), B (青) 値から色相を算出し、予め求めておいた色相と温度の関係より求めた。

3. 観測角度による誤差の低減

3.1 観測角度の情報を含んだ校正実験

正確な温度を測定するには、色相と温度の対応関係を求める校正実験と観測角度による変化量を求める実験が必要である。本研究では画像の構成から観測角度による変化量を同時に測定できる校正実験を行った。

1 枚の画像から温度、色相と共に観測角度の情報を加えるために、Fig. 2 のように予め CCD カメラと観測面との距離と実際に撮影できる画像の幅を測定した。また、観測角度は中心を 0° としてシート光側をプラスとした。

感温液晶の呈色は、等温度場であっても固定された入射シート光に対し観察する角度 (反射光) により変化する。観察画面中央を直角とした場合、画面の左右の場所ではそれぞれの位置でそれぞれの角度を持つことにより呈色が異なる。正しい温度測定のためには、これを補正する必要がある。なお、入射シート光の水平線に対し上下方向の位置 (角度) による呈色の相違は認められなかった。

画像は画素から成り立っており、画素の位置は座標がつけられている。予め測定した位置関係から、画素の座標と観測角度の対応関係を求めることで、画素の位置が観測角度の情報となる。そのため、Fig. 3 のようにシート光と同軸方向の画素の座標を用いて短冊状に分割した。本研究では測定した可視化画像をプログラム上で画素の座標から観測角度に分類して校正実験を行った。

3.2 校正結果

校正実験では、W 30 (日本カプセルクロダクツ製

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Observation angle between Sheet light and temperature field

Fig. 3 Division of image

0.03 wt%) について、 24°C から 28°C まで 0.1 K ごとに等温度場をスリット幅 5 mm で撮影し、観測角度ごとにその温度に対する色相 H を求めた。Fig. 4 に観測角度が 0° の場合と測定画面の両端である $\pm 6^\circ$ における結果を示す。同様に、油槽内に W 3237 感温液晶 (日本カプセルクロダクツ製 0.03 wt%) を懸濁し、 30.0°C から 0.1 K 刻みで 34.0°C までの校正結果を Fig. 5 に示す。この Fig. 4, Fig. 5 の結果より、温度が上がるに従い、色相値は赤を示す小さい値から青を示す大きな値に変化している。この変化している範囲において、温度と色相値の換算式を用いることで、可視化画像から温度の測定ができる。また、色相 0 と 4 [rad] 付近では、温度が変化しても色相値の変化量が少ない。同じ色相において温度幅を持つことになるので、温度分解能が低いことが分かる。

観測角度について比較すると、色相と温度の関係は、 $\pm 6^\circ, 0^\circ$ のそれぞれで同様な変化の過程を示すが、変化の始まる温度と終わる温度が異なっている。Fig. 4 より 25.0°C では $+6^\circ$ (シート光側) の色相値が黄色を示す 1 [rad] で、 -6° の色相値が赤を示す 0 [rad] である。この校正結果より、感温液晶は同じ温度でも観測角度を $+$ 方向 (シート光側) で 0° (中心部) よりも高い温度の色彩を示し、逆に $-$ 方向で 0° のときよりも低い温度の呈色を示す。観測角度の補正を行わず温度換算したならば、画像の色相値が 2 [rad] だとすると、観測角度 6° では 25.7°C を示しており、 -6° では 26.5°C を示している。よって、画像の両端で温度換算の誤差が 0.8 K 程度発生する。

本研究では、観測角度 1° ごとに $+6^\circ$ から -6° の温度換算式を求め、観測角度による誤差を低減させた。温度換算式は観測角度 1° ごとに求めるが、本論文では代表として W 30, W 3237 の $0^\circ, \pm 6^\circ$ について示す。

W 30 感温液晶

観測角度: -6°

$$\begin{aligned} T &= 0.586H + 24.904 & (0.241 \leq H < 1.562) \\ T &= 1.513H + 23.456 & (1.562 \leq H < 2.171) \\ T &= 0.263H + 26.169 & (2.171 \leq H \leq 4.100) \end{aligned} \quad (1)$$

観測角度: 0°

$$\begin{aligned} T &= 0.553H + 24.703 & (0.224 \leq H < 1.702) \\ T &= 1.961H + 22.307 & (1.702 \leq H < 2.050) \\ T &= 0.303H + 25.705 & (2.050 \leq H \leq 4.082) \end{aligned} \quad (2)$$

観測角度: 6°

$$\begin{aligned} T &= 0.555H + 24.400 & (0.293 \leq H < 1.694) \\ T &= 1.747H + 22.382 & (1.694 \leq H < 2.131) \\ T &= 0.287H + 25.493 & (2.131 \leq H \leq 4.080) \end{aligned} \quad (3)$$

W 3237 感温液晶

観測角度: -6°

$$\begin{aligned} T &= 0.367H + 30.618 & (0.327 \leq H < 1.589) \\ T &= 1.038H + 29.552 & (1.589 \leq H < 2.367) \\ T &= 0.237H + 31.449 & (2.367 \leq H \leq 3.964) \end{aligned} \quad (4)$$

観測角度: 0°

$$\begin{aligned} T &= 0.303H + 30.485 & (0.188 \leq H < 1.531) \\ T &= 0.937H + 29.515 & (1.531 \leq H < 2.322) \\ T &= 0.276H + 31.050 & (2.322 \leq H \leq 4.081) \end{aligned} \quad (5)$$

観測角度: 6°

$$\begin{aligned} T &= 0.326H + 30.291 & (0.142 \leq H < 1.773) \\ T &= 1.414H + 28.363 & (1.773 \leq H < 2.128) \\ T &= 0.264H + 30.809 & (2.128 \leq H \leq 4.031) \end{aligned} \quad (6)$$

観測角度 1° ごとに 13 分割して温度換算を行ったため、観測角度の誤差が $1/13$ に狭くなった。また、Fig. 4 より色相値 2 [rad] 付近では傾きが変わるため、温度への換算式は色相の傾き変化が見られる $0.5 \sim 1.5$ [rad] 付近、 $1.5 \sim 2$ [rad] 付近、 $2 \sim 4$ [rad] 付近の 3 つに分けた。

Fig. 4 Relation among hue, temperature and angle (W 30)

Fig. 5 Relation among hue, temperature and angle (W 3237)

3.3 自然対流場の温度分布

加熱体からの自然対流場について熱流の状況を求めた。温度は観測角度による誤差を低減させるために、Fig. 3 で示した画像の座標で観測角度の情報を加え、その観測角度に応じた温度換算式より求めた。

Fig. 6 は W 30 感温液晶を用いて、観測角度による誤差の補正前と補正後での自然対流場における温度分布を求めた結果である。加熱体の表面部分に高温で薄い層が存在すること、上昇流が複雑な形状であり、更にその中心部分が高温であることが示されている。補正前の画像では右側のみが高温を示しており、自由表面である上部に様に堆積していない。この結果は、伝熱現象を考慮すると不自然であり、校正結果で述べた観測角度の $+$ 方向で高温を示す結果と一致する。しかし、補正後の画像は上部に様に堆積が見られ、対流の状況が忠実に示されている。よって、観測角度を補正した温度測定の有効性が示された。

4. 感温液晶の混濁

4.1 感温液晶の区別

測定温度幅を広げるため、呈色範囲の異なる2つの感温液晶を混濁した。2つの感温液晶を用いる場合は、温度換算する前に計算機で両者を見分ける必要がある。

2つの感温液晶にはW 30とW 3237を用いた。Fig. 4, Fig. 5から分かるように、2つの感温液晶は呈色温度が異なるが、同じ色相値を示している。そのため、この2つを混濁して色相から温度を求めようとする、同じ色相値を持つためどちらの感温液晶で呈色しているかを判定できない。

感温液晶を区別するために、画像の明るさを示す明度(R+G+B)を用いた。明度の差を付けるため、W 30とW 3237の濃度をそれぞれ0.01 wt%, 0.03 wt%に設定し、明度の差を大きくするため、Fig. 7のように画素5×5の平均値で感温液晶の区別を行った。この領域で平均値を取れば、W 3237の濃度が大きい領域内に存在する粒子が多く、それだけ明度の差が大きくなる。また、Fig. 7の領域を用いることで、感温液晶の呈色むらに対するばらつきを低減させる効果もある。更に明度の差を大きくするため、シート光の厚みは5 mmから10 mmに変更した。明度の差はW 30とW 3237を混濁した温度成層から求めた。温度成層は上部を高温、下部を低温とすることで対流がなく、温度設定により2つの感温液晶ですべての発色状態にすることができる。この温度成層を用いることで、濃度の違いによる明度の差を見ることができる。

温度成層における明度と色相の関係をFig. 8に示す。濃度を変えたため、色相値0.5~4 [rad]の範囲において、明度はW 3237を示す大きい値、W 30を示す中間の値、背景を示す小さな値の3つに区別できる。色相値0と4 [rad]付近でW 3237とW 30の明度値が重なっている。以上の結果より、感温液晶の判定には、W 30とW 3237の重ならない色相の範囲において明度の大きさで条件を設定した。W 30の条件は色相0.5~3.8 [rad]の範囲で明度50~100の大きさとした。W 3237の条件は色相-0.2~4.5 [rad]の範囲で明度100~220の大きさとした。また、Fig. 8の内容は、温度成層なので連続的な色相値をとることが考えられるが、2つの感温液晶を混ぜたため、1つでの感温液晶の呈色している画像の範囲が狭く、Fig. 7のような5×5画素の平均から求めたため、解像度が落ちて連続的な値を示していない。

プログラムでは、Fig. 7の領域でR, G, B値の平均値を求め、色相と明度を算出して、Fig. 8のW 30の条件と一致していればW 30であると認識し、W 3237の条件と一致していればW 3237であると認識する。このようにして、温度成層を対象に判別した結果をFig. 9に示す。

Fig. 9では温度成層上部でW 3237を、下部でW 30

Fig. 6 Temperature distribution and flow patterns with modification of angle(W30)

Fig. 7 Distinction of two liquid crystal

を判定している。W 3237が高温で、W 30が低温で呈色するので、正しい結果を認識できた。また、画像の中央よりやや上の層で、白地の部分がある。これは2つの感温液晶が呈色していない温度範囲があるためである。

温度成層であるため、温度は水平方向に同じ温度であるが、W 30を判定している部分が水平でなく左上がりになっている。Fig. 4, Fig. 5で示したように、観測角度により温度と色相の関係が異なり、区別するときに測定できる色相値の範囲が限られているため、観測角度に

より測定可能な温度が異なっている。そのため、画像の左側（観測角度が $-$ 側）では右側に比べ高温側が測定できるので、W 30 を判定している部分が左上がりになっている。

4.2 温度分布の算出

2つの感温液晶を区別できるように実験条件を変更したため、1つの感温液晶を懸濁した状態と2つを混濁した状態で校正結果を比較した。混濁状態では1つの状態での温度換算式とは異なっていたので、混濁状態で新たに校正実験を行った。混濁状態でも観測角度の補正を行うために、校正実験では色相と温度の関係と、Fig. 3 のように画素の座標から観測角度による変化量を求めた。

Fig. 10 は観測角度 0° における色相と温度の関係である。これより、温度換算式を求めた。温度換算式は3.2と同様に観測角度 1° ごとに求めるが、本論文では代表として混濁時の W 30, W 3237 の 0° について示す。

W 30 感温液晶（混濁， 0° ）

$$\begin{aligned} T &= 0.627H + 24.762 & (0.282 \leq H < 1.655) \\ T &= 1.125H + 23.938 & (1.655 \leq H < 2.165) \\ T &= 0.361H + 25.591 & (2.165 \leq H < 3.992) \end{aligned} \quad (7)$$

W 3237 感温液晶（混濁， 0° ）

$$\begin{aligned} T &= 0.449H + 30.664 & (0.195 \leq H < 1.788) \\ T &= 0.920H + 29.801 & (1.788 \leq H < 2.202) \\ T &= 0.415H + 30.913 & (2.202 \leq H < 3.957) \end{aligned} \quad (8)$$

混濁状態で温度分布を求めるには、Fig. 7 の領域で Fig. 8 の条件で区別した後、その領域内で各画素ごとに色相を求め、区別した結果に基づいて Fig. 10 の結果より温度に換算する。さらに、Fig. 6, Fig. 7 の温度分布と同様に、観測角度による誤差を低減した。この方法で温度換算すれば、感温液晶の区別には 5×5 画素で行うが、温度換算は1画素の解像度になる。この方法を用いて自然対流の温度分布を求めた結果を Fig. 11 に示す。

自然対流において、高温側の感温液晶で測定した温度範囲の上昇流が、低温側の感温液晶で測定した温度範囲の層を持ち上げているのが確認できた。W 30 と W 3237 感温液晶の呈色しない部分では測定できないが、2つの感温液晶の温度域を利用することで、 24.5°C から 33.0°C までの温度範囲を測定することができた。

2つの感温液晶を用いて温度分布を求める時間は、計算機の条件やプログラムによっても異なるが、9秒程度であった。

4.3 混濁状態での流速測定

前節で解析した自然対流の速度解析を行った。感温液晶を用いて流速を算出する場合は相関法によって行われている²⁾。相関法には相関係数⁵⁾を用いた方法や簡略化した輝度差平均法⁶⁾がある。本研究では計算時間が短く、正確にベクトルを計算できる輝度差平均法を用いた。相関計算を実行する小領域のマトリックスを画素 27×27 の領域で、輝度情報 R+G+B として算出した速度分布を Fig. 12 に示す。中心部分に加熱体からの上昇流を捉

Fig. 8 Relation between value and hue

Fig. 9 Result of distinction in thermal stratification field

Fig. 10 Relation between hue and temperature with two liquid crystal (0°)

えている。しかし、中央よりやや上の層で過誤ベクトルと思われるような、様々な向きを示しているベクトルが存在する。この結果は、2つの感温液晶を混ぜているためこの部分が呈色しておらず、濃度パターンを得ることができずに判定を間違えたと考えられる。

過誤ベクトルをなくすためには、感温液晶の呈色して

Fig. 11 Temperature distribution and flow patterns with mixed liquid crystal

いる領域で処理をすれば良く、感温液晶の区別ができる領域が呈色している条件として処理を行った。感温液晶の区別をして W 30, W 3237 のどちらかであれば流速の計算をして、条件を満たさなければ計算は行わない。その方法で速度分布を求めた結果を Fig. 13 に示す。

この結果を見ると中央よりやや上の層でベクトルがなく、過誤ベクトルをなくすことができた。そして、中心部分で上昇流が測定できている。このように、感温液晶の区別する条件を用いて輝度差平均法を用いれば速度ベクトルが求められ、Fig. 11 の温度分布との結果と合わせれば温度と速度の同時計測が可能である。

計算条件やプログラムによっても異なるが、Fig. 13 の処理時間は 6 分弱程度で、Fig. 12 の処理時間は 9 分半程度であった。Fig. 13 のような過誤ベクトルの除去を行った場合は、大幅に計算時間が短縮できた。感温液晶を区別する時間は、速度を求める時間に比べて非常に短く、呈色している部分のみで速度を求めるため、速度を求める点が減少し、計算時間が短縮できた。

5. 結 言

本研究では校正実験で画素の座標により観測角度の情報をつけ加え、色相と温度の関係を求め、同時に観測角度における色相の変化量を求めた。その結果を利用して、観測角度による誤差を低減することができた。

本研究では 2 つの感温液晶を明度で区別して、2 つの温度域を利用して測定温度域の拡大を行った。また、混濁した状態で感温液晶を区別をした条件を用いると、過誤ベクトルがなく流速を算出することができた。測定温度幅を広げて、自然対流の温度分布と速度分布の同時計測を行った。

なお、2 つの感温液晶の濃度を変えて懸濁し、それらの明度の差から感温液晶を識別する今回の方法は、3 つ

Fig. 12 Velocity vector distribution and flow patterns with two liquid crystal

Fig. 13 Velocity vector distribution and flow patterns using condition of distinction

の場合には明確な判定は困難となる。また、動きの大きい流れ場には、流速の違いにより、同じ濃度であっても明度が相違することにより識別が困難となることが考えられる。

参考文献

- 1) 秋野：感温液晶を用いる温度分布の可視化，熱物性 Vol. 7, No. 4, (1993), 259~265.
- 2) 木村，小澤，真鍋，竹中，高森：感温液晶を用いた温度場と速度場の同時計測，計測自動制御学会論文集，Vol. 27, No. 8, (1991), 870~877.
- 3) 小澤，篠木，木村，梅川：自然対流場の 3 次元画像計測，可視化情報，Vol. 17, No. 64, (1997), 41~45.
- 4) 清水，亀岡：感温液晶による可視化温度場の自動計測に関する研究，可視化情報，Vol. 17, suppl. No. 2, (1995), 289~292.
- 5) 木村，高森，井上：相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測—円柱後流の変動渦への適用—，計測自動制御学会論文集，Vol. 23, No. 2, (1987), 101~107.
- 6) 幸，井上，加賀，山口，吉川：簡易相関処理による煙可視化像からの気流速度の計測，流れの可視化，Vol. 8, No. 30, (1988), 293~296.