

目視角度の影響を考慮した感温液晶法による温度計測と
熱対流現象への応用*藤沢 延行^{*1}, 松浦 勉^{*2}
船谷 俊平^{*3}, 弦 巻 明^{*4}Temperature Measurement Technique by Liquid Crystal Thermometry
Considering the Effect of Viewing Angle and Its Application
to Thermal Convection PhenomenonNobuyuki FUJISAWA^{*5}, Tsutomu MATSUURA,
Shumpei FUNATANI and Akira TSURUMAKI^{*5} Niigata University, Dept. Mechanical and Production Engineering,
8050 Ikarashi 2, Niigata, Niigata, 950-2181 Japan

Field temperature measurement technique with encapsulated liquid crystal particles suspended in a liquid has been investigated considering the viewing angle effect on the color to temperature transformation. Two calibration techniques are studied, one is a neural network and the other is a spline fitting technique, where the calibration points are distributed over the image plane in order to consider the viewing angle effect. The calibration study is carried out with uniform temperature field image captured at various temperatures. It is found that the calibration error due to the viewing angle variation is reduced with an increase in the number of calibration points and by the introduction of smoothing technique. It is found that the spline fitting technique is superior to the neural network technique considering the evaluated temperature error and computing time. The spline fitting technique is applied to the temperature measurement of thermal convection over a heated surface and the thermal structures generated near the top and bottom boundaries are discussed.

Key Words: Temperature Measurement, Flow Visualization, Liquid Crystal, Calibration, Thermal Convection, Digital Image Processing

1. 緒 言

熱流体における温度計測技術は、工学上重要な課題であり、過去より、熱電対や熱線、熱膜などを流体中に挿入して計測する方法がとられてきた。しかしながら、これらは点計測であるため同時多点計測が困難なことやプローブ挿入により流れ場を乱すなどの問題がある。これに対し、近年、感温液晶やLIFなどによる温度場の可視化計測技術が進歩し、流体中の温度分布を非接触で同時多点計測することが可能である。また、これらの技術は、将来的には3次元空間における温度場の実時間計測にも実用化されることが期待される。

感温液晶を用いた温度計測技術は、マイクロカプセル化された液晶粒子を作用流体である液体中に浮遊させ、それに白色光を照射したときの発光波長(色)が液体温度に依存することを利用して温度計測が行われる。初期の研究においては、温度場の定性的可視化観

察⁽¹⁾が中心であったが、その後、カラー写真技術⁽²⁾、フィルターとモノクロ CCD カメラを組み合わせた方法⁽³⁾、そしてカラー CCD カメラによる色・温度検定⁽⁴⁾によって定量化が検討された。ただし、最近ではカラー CCD カメラを用いた計測法が主流になりつつある。このとき、色・温度検定には、HSI 色空間を利用することが定量化上有効であり、色相情報を示すヒュー-Hを用いた温度検定⁽⁵⁾が広く応用されてきた。しかしながら、最近では、より多くの色相情報を検定に使用するH/I検定⁽⁶⁾やニューラルネットワーク検定⁽⁷⁾が提案されている。これらの検定法は、検定精度や測定温度範囲がH検定よりかなり向上するため有効な方法である⁽⁸⁾。一方、感温液晶の呈する色は同時に白色光の入射方向と観察者の位置関係にも強く依存する⁽⁹⁾⁻⁽¹³⁾。この目視角度の影響は、感温液晶を用いた温度計測上重要であるが、従来この影響を考慮した温度計測例⁽¹²⁾⁽¹³⁾はあるが、一般的検定方法および検定誤差についての検討はされていない。

本研究においては、感温液晶の色・温度検定において目視角度の影響を実験的に考察するとともに、それを考慮した検定法の提案、ならびにその有効性を下面

* 原稿受付 1999年4月20日。

^{*1} 正員, 新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。^{*2} 正員, 群馬大学工学部(〒376-8515 桐生市天神町1-5-1)。^{*3} 学生員, 新潟大学大学院。^{*4} 新潟大学工学部。

E-mail: fujisawa@eng.niigata-u.ac.jp

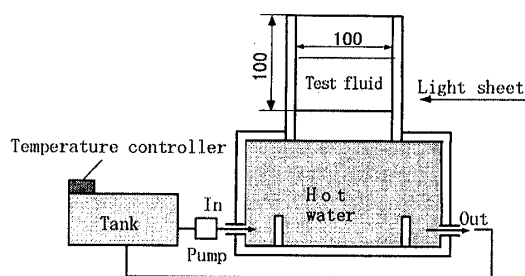


Fig. 1 Experimental test section

加熱によって発生する熱対流現象に適用することで明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

2.1 検定実験 本実験に使用した感温液晶はカイラルネマチック液晶であり、それは平均粒径が $10 \mu\text{m}$ のマイクロカプセル化された液晶粒子が 50% スラリーの状態提供されたものである。この液晶を作動流体である精製水中に体積濃度で 0.004% 加えて検定実験を行った。なお、この液晶は $27.7^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ までの 2.3°C の呈色温度域を有する。検定実験は、図 1 に示すように、縦横高さがすべて 100mm のアクリル製水槽に供試流体である感温液晶と製精水の混合液を高さ 50mm まで入れて行った。実験は、供試水槽の銅製底面に接する温水を一定温度 (32°C) まで加熱した後、自然冷却することで種々の温度における色・温度検定を行った。ここに、温水タンクは回流式となっており、水槽外部に設けた加熱用タンクに備えられた水温調節装置で一定温度 ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) になるように温度制御が可能である。温度検定においては、供試流体を十分に混合し、水槽中央部で一様温度場 ($\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以下と推定) が得られるようにし、同時に、その際の供試流体の温度を測定精度 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ の熱電対を用いて測定して検定温度とした。一方、可視化観察は、図 2 に示すように、水槽側面に置かれたストロボ発光装置からのシート光 (厚さ 3mm) の入射に対する感温液晶の呈色を、シート光に対し垂直方向 210mm の位置から 3 板式のカラー CCD カメラ (画像解像度 768×494 ピクセル、RGB 信号に対し各 8 ビット) で観測することで行った。その撮影範囲は、縦横が各々 $30\text{mm} \times 40\text{mm}$ の領域である。この検定画像は、直接フレームグラバでデジタル化され (512×512 ピクセル、RGB 信号に対し各 8 ビット)、パーソナルコンピュータ内のフレームメモリに格納される。格納された RGB カラー画像は、コンピュータ内でソフト的に HSI 色空間に変換して検定画像とした。

2.2 熱対流実験 図 1 および図 2 に示した感温液

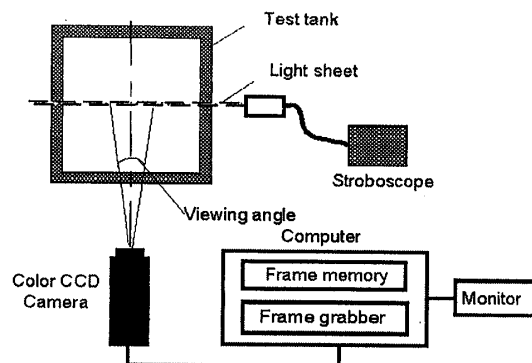


Fig. 2 Experimental setup for calibration study

晶の検定実験装置を用いて熱対流実験を行った。供試水槽には高さ 35mm の感温液晶と製精水の混合液を入れ、水槽底面を 32°C に保たれた温水で加熱した。ただし、供試流体の上面はアクリル製でほぼ断熱条件である。したがって、レイレー数 $Ra (= \alpha g \Delta T h^3 / \nu \kappa) = 6.2 \times 10^6$ である。ここに、 α : 体積膨張係数、 g : 重力加速度、 ΔT : 流体層上下面の温度差、 h : 流体層の高さ、 κ : 温度伝導率、 ν : 動粘度である。実験においては、加熱面ならびに断熱面からそれぞれ 5mm 離れた位置での水平方向 2 断面の温度分布を同時計測するため、2 台のストロボスコープから厚さ 3mm のライトシートを 1/30 秒ごとに交互に照射した。ただし、2 台のストロボの発光タイミングは、撮影に用いたカラー CCD カメラの垂直同期信号に基いて決定した。ここに、カラー CCD カメラは測定部上方 380mm の位置に固定し、測定部中央 $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ の領域を撮影した。なお、この実験における感温液晶の色・温度検定は、同一条件下で得られた一様温度画像に基いて行った。一方、感温液晶粒子をトレーサと考え、1/3 秒の時間間隔の 2 枚の輝度画像に対し PIV 法を適用し速度場も同時に計測した。ここに、解析アルゴリズムとしては輝度差累積法を用い、相関マトリックス 30×30 ピクセル、探索領域 58×58 で行った。ただし、ここで用いた速度場解析法は、文献 (14) に詳しい。

2.3 ニューラルネットワーク検定 図 3 は、本研究の感温液晶の示す色と温度の関係を検定するために用いた階層型ニューラルネットワークの構造である。すなわち、入力層ユニット数 3、中間層ユニット数 4、出力層ユニット数 1 の 3 層構造で、入力層と中間層には -1 を出力する閾値ユニットが付加されてある。各ユニット間は結合荷重で結ばれており、ニューラルネットワークの出力温度 T_e と教師信号である測定温度 T_m の学習誤差 $E = \sum (T_e - T_m)^2$ が最小となるように結合荷重を誤差逆伝播法による学習で逐次修正を施すことにな

る。このようなニューラルネットワークの構造は、RGB信号を入力とするKimuraらのモデル⁽⁷⁾とほぼ同様であるが、本研究では入力層のパラメータとしてHSIを用いたことと中間層ユニット数に違いがある。ここに、中間層のユニット数の選定については、4以上では学習誤差の減少傾向が飽和ぎみになったことから決定した。一方、学習回数は学習誤差の減少状況と計算時間から判断して5000回に設定し、シグモイド関数に現れるニューロ温度および誤差逆伝播法における収束係数は試行錯誤的に最適値を求めた。

2.4 スプライン検定 感温液晶の示す色パラメータであるHSIと測定温度 T_m との関係はスプラインなどの近似曲線を用いて表現することが可能である。すなわち、検定画像の示す各々の色パラメータに対し、 $H=f(T_m)$, $S=g(T_m)$, $I=h(T_m)$ なる関係にスプライン関数(区分的3次多項式)を適用することで各々決定すると、HSI軸からなる3次元空間内に温度をパラメータとする1本の曲線を描くことができる。この関係を用いて、逆にある実験画像の示すHSIが与えられたとき(すなわち、上記の3次元空間内の1点が与えられたとき)、この点と描かれた3次元空間曲線上の点との距離を最小にする温度を試行錯誤的に算出することができる。したがって、感温液晶の示す色パラメータHSIと温度との関係は、良く知られているようにいずれかの1つの色パラメータでは一意に温度を決定できないが(図5参照)、すべての色パラメータの組み合わせを用いればすべての温度範囲において一意に温度を決定できることを利用した。

2.5 領域分割法 感温液晶の示す色が見る角度によって変化する現象、いわゆる目視角度の影響を色・温度検定において考慮するため、画像の分割検定について検討した(図4参照)。すなわち、検定画像を $N \times N$ の小領域に分割し(N :検定画像一辺の分割数)、その小領域ごとに領域平均した色パラメータ H_{ij} , S_{ij} , I_{ij}

(i, j は各小領域の位置を示す)を求める。ここに、検定に用いる一様温度画像は、いずれの小領域においても一定温度であるため、各小領域における色パラメータと温度との関係は既知である。この小領域ごとの色と温度の関係にニューラルネットワーク検定あるいはスプライン検定を適用することで、目視角度の影響を考慮した色・温度検定を行う。

分割検定においては、隣り合う小領域間の境界付近で目視角度の影響が急変することになる。この影響を取り除き、より目視角度の影響を低減するために、以下に示すような平滑化の導入を試みた。すなわち、検定画像の任意の位置 (x, y) における評価温度 $T_e(x, y)$ は、それが含まれる小領域での検定結果だけでなく、周辺の小領域での検定結果の影響も受ける。よって、任意の小領域中心における評価温度を T_{eij} とすると、画像内の任意の位置での評価温度 $T_e(x, y)$ は重み関数 W_{ij} を用いて次のように表される。

$$T_e(x, y) = \sum W_{ij} T_{eij} \quad (1)$$

ここに、

$$W_{ij} = w_{ij} / \sum w_{ij}, \quad w_{ij} = \exp(-s \{ (x-x_{ij})^2 + (y-y_{ij})^2 \}) \quad (2)$$

ただし、 s : スムージング係数、 T_{eij} : 小領域中心の評価温度、 x, y : 画像内の任意の画素位置、 x_{ij}, y_{ij} : 各小領域の中心位置である。ここに、 w_{ij} は対象とする画素位置 (x, y) と小領域の中心位置間の距離が増すと急激に小さくなる関数である。一方、スムージング係数 s の値は、検定実験から得られる一様温度画像を用いて求めた。すなわち、まず s 値を固定し、一様温度画像内のすべての画素における温度誤差を式(1)を用いて算出し、その画像内における温度誤差の総和を計算する。これをすべての検定温度に渡って合計した総温度誤差を求める。このような操作を様々な s 値について行い、総温度誤差が最小となる s 値を採用した。

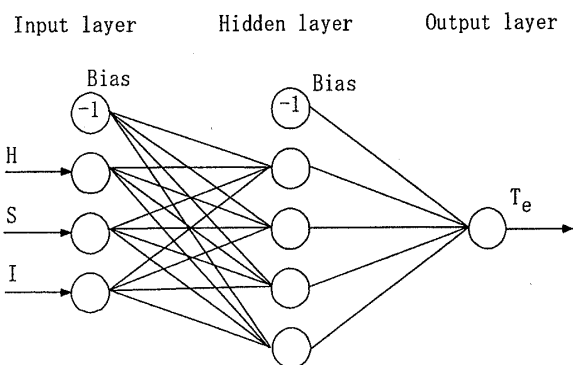


Fig. 3 Neural network model

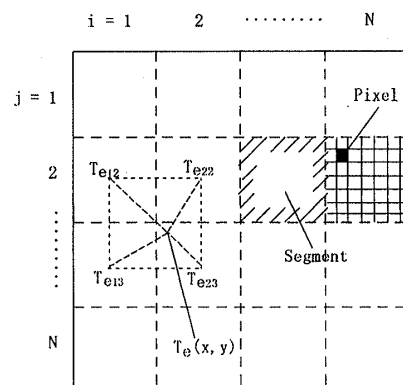


Fig. 4 Image division for calibration

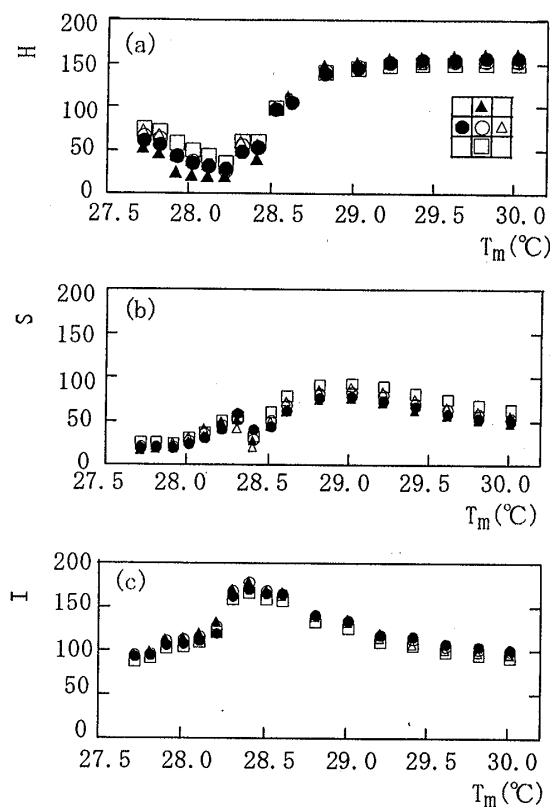


Fig. 5 Optical characteristics of liquid crystal
(a) Hue, (b) Saturation, (c) Intensity

3. 結果および考察

3.1 感温液晶の光学的特性 図5(a), (b), (c)は、一様温度での検定実験の結果得られた供試感温液晶の色・温度特性をHSI色空間で表し、これらを測定温度 T_m に対してプロットした結果を示す。ただし、図の縦軸は、いずれも測定結果を256階調で表示した結果である。なお、ここでは、検定画像を 3×3 の9分割した各小領域における平均HSIを主な5小領域について示した。ヒューHの測定結果によると、低温域で最小を示したのち、Hは温度とともに増大傾向を示すが、高温域ではHの温度依存性はかなり小さくなる。同様に、サチュレーションS、インテンシティIの温度による変化はいずれも、低温域で強く見られるが、高温域では弱まる傾向にある。このようなHSI色空間における感温液晶の特性は、過去に報告された感温液晶の光学的特性の測定結果⁽⁶⁾とも類似の傾向にある。一方、図から明らかのように、感温液晶の光学的特性は分割小領域の位置によってかなり異なる。これは、シート光に対する観測角度、いわゆる目視角度の影響を示唆するものと考えられる。この影響は、すべてのパラメータに対して認められるが、Hの低温域とSの全温度

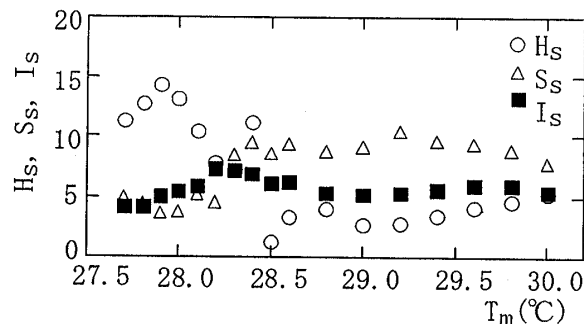


Fig. 6 Variation of color due to viewing angle effect at various temperatures

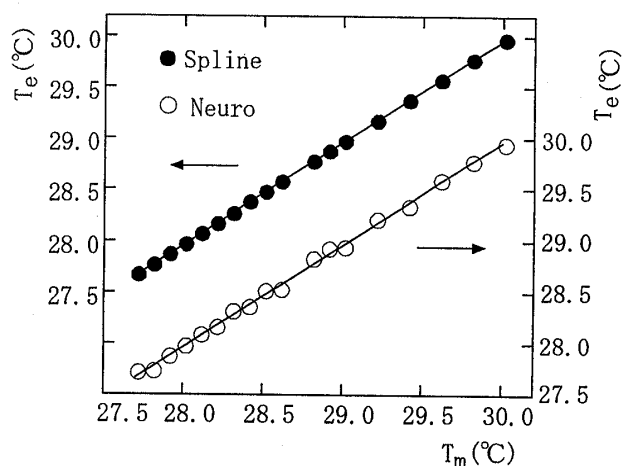
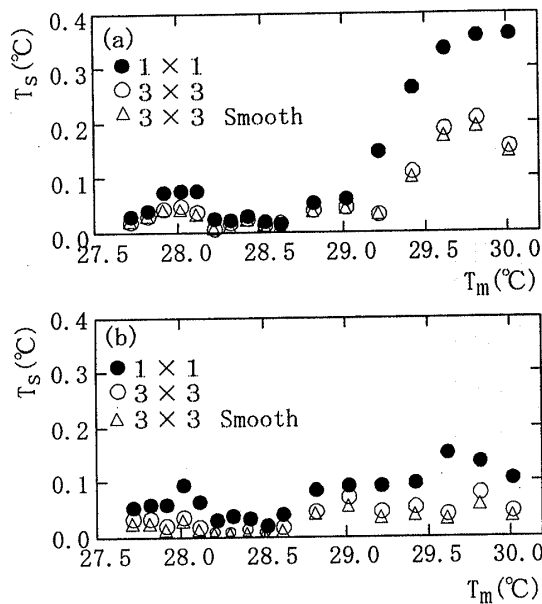


Fig. 7 Evaluated temperature T_e versus measured temperature T_m

域においてかなり強く、Iに対しては比較的小さい。

図6は、図5のHSIの画像内の平均値からのばらつきを標準偏差(H_s, S_s, I_s)で表し、それらが測定温度 T_m によって変化する関係を示す。図によると、低温域における H_s ならびに S_s が全温度域に渡り大きく、それらに及ぼす目視角度の影響が特に顕著であることが明らかである。なお、このような画像内におけるHSIの変化は、画像中央で得られた色・温度の関係をを用いると、 0.25°C の温度変化に対応することがわかる。

3.2 色・温度の点検定 図7は、一様温度画像を用いた色・温度検定の一例として、画像中心におけるHSIと測定温度 T_m の関係を、それぞれニューラルネットワークおよびスプラインで検定した結果である。ここでは、これらの検定によって評価した温度 T_e と測定温度 T_m の関係を示した。これらの関係は、いずれもほぼ正比例の関係にあり、入力パラメータであるHSIと測定温度 T_m の関係がニューラルネットワークあるいはスプラインによって良好に検定されたことがわかる。しかしながら、詳細に見ると、ニューラルネットワークによる結果は、 $T_e = T_m$ の関係はほぼ成立するが、多

Fig.8 Calibration error T_s versus temperature T_m

(a) Neural network, (b) Spline

少データがばらつくことがわかる。このような比例関係からのばらつきは、熱電対の温度計測精度には依存しないと考えられ、それを検定曲線のあてはめ誤差(標準偏差)として算出すると、ニューラルネットワークでは 0.03°C であった。これに対し、スプライン検定ではスプラインがすべての測定点を通ることから曲線あてはめ誤差は 0°C となる。

3.3 色・温度の領域分割検定 図8(a), (b)は、それぞれニューラルネットワーク検定(a)ならびにスプライン検定(b)における温度評価誤差(標準偏差)を検定温度ごとに示した結果である。ただし、ここでは分割なし(1×1)の場合と 3×3 に分割検定した場合を比較して示す。ニューラルネットワーク検定では、いずれの場合においても、低温域で温度評価誤差は小さいが、高温域ではかなり大きい。これは、図5からもわかるように、高温域では、HSIいずれのパラメータも温度依存性が小さくなるため、わずかな目視角度の影響による検定誤差もかなり増幅することを示す。一方、スプライン検定では、定性的にはニューラルネットワーク検定とほぼ同様な温度評価誤差の分布を示すが、高温部での温度評価誤差の大きさはかなり減少する。これは、スプライン検定ではニューラルネットワーク検定の場合より検定誤差を増幅しにくいことを反映している。一方、いずれの検定法においても分割検定による温度評価誤差の減少ならびに平滑化の導入による温度評価誤差の減少効果が認められ、両者の有効性を示唆する。

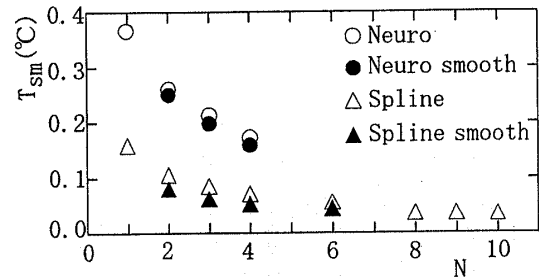
Fig.9 Calibration error versus number of image division N

Table.1 Relative CPU time

	1×1	3×3	3×3 Smooth
Neuro	22	190	200
Spline	1	2	7

図9は、ニューラルネットワーク検定ならびにスプライン検定における温度評価誤差の最大値を算出し、それと検定画像一辺の分割数 N との関係を示した。一般に、 N が増大すると、ニューラルネットワーク検定、スプライン検定のいずれにおいても、温度評価誤差は減少するが、より大きな分割数では、スプライン検定結果が示すように誤差の減少は飽和ぎみになる。一方、表1に示すように、スプライン検定における計算時間は、ニューラルネットワーク検定の学習に要する時間の $1/22$ であり、分割数を大きくとる必要がある場合(目視角度の影響の大きい場合)には、この差はさらに増大する。また、平滑化の導入による温度評価誤差の減少効果も同様に認められるが、それに要する計算時間の増加はスプライン検定ではかなり大きいといえる。このため、実用的にはスプライン検定を用い画像分割数 N を多少大き目にとって分割検定する方法が有効であると判断される。

3.4 温度計測の不確かさ 本実験の感温液晶を用いた温度計測の不確かさの要因としては、ここで考察した目視角度の影響を含む温度検定誤差以外に(1)熱電対による温度測定誤差、(2)感温液晶の劣化、(3)時間応答性、(4)画像処理などが考えられる。本実験の温度計測の不確かさ(約95%の包括度)は、目視角度を無視したニューラルネットワーク検定の場合 0.37°C 、目視角度の影響を考慮したスプライン検定(10×10 分割)の場合 0.09°C となり、目視角度を考慮したスプライン検定により温度計測の不確かさをかなり減少させることができる。

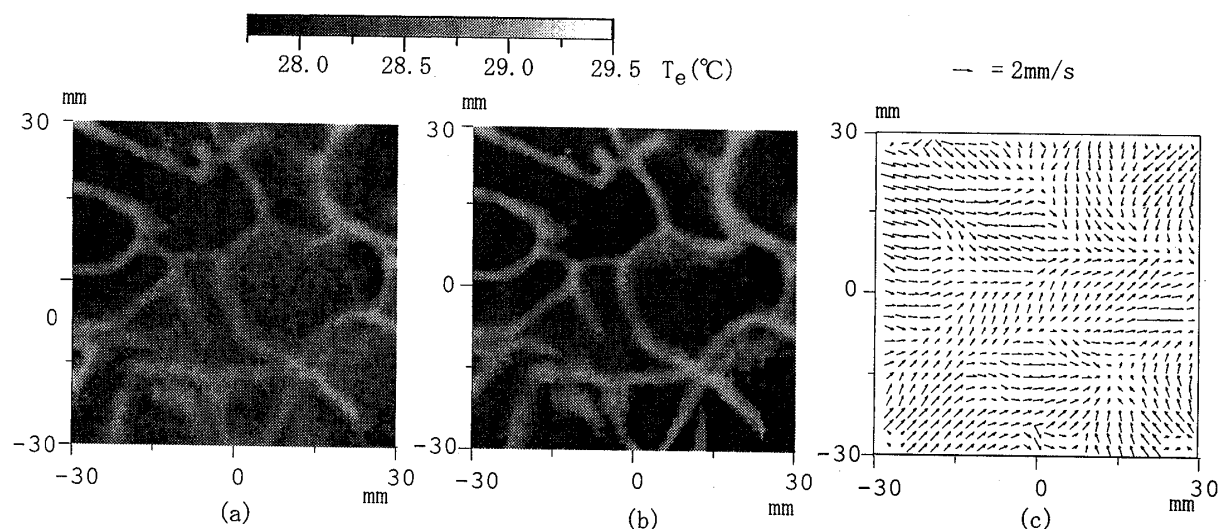


Fig. 10 Simultaneous measurement of temperature and velocity over a heated surface
 (a) Temperature distribution (1×1 Spline), (b) Temperature distribution (10×10 Spline)
 (c) Velocity distribution

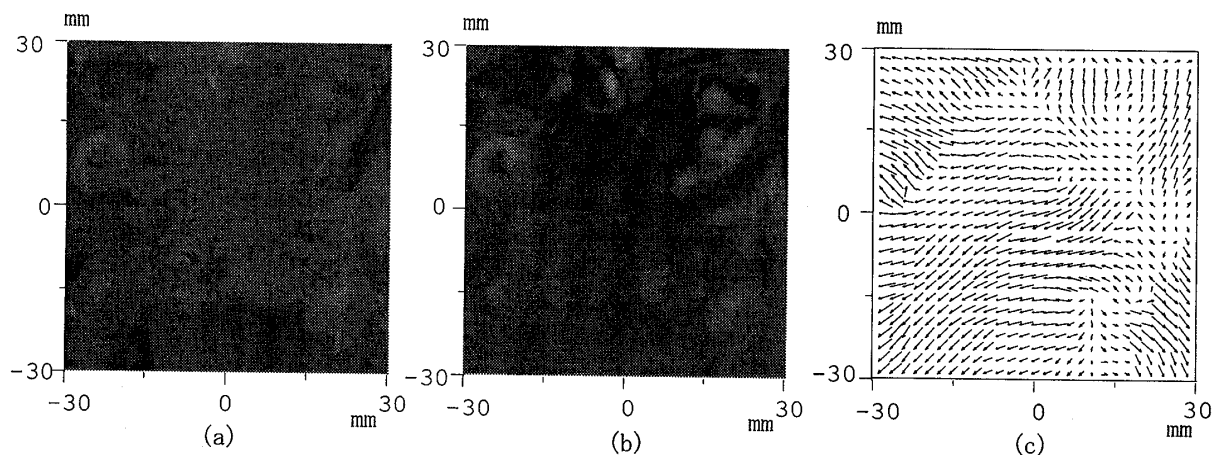


Fig. 11 Simultaneous measurement of temperature and velocity under an insulated surface
 (a) Temperature distribution (1×1 Spline), (b) Temperature distribution (10×10 Spline)
 (c) Velocity distribution (For gray scale and velocity magnitude see Fig. 10)

3.5 熱対流現象に対する応用 図10は、供試水槽を用いて高さ35mmの流体層を下面から加熱した際に発生する熱対流現象を感温液晶で可視化し、それにより得られた温度分布の測定結果である。ただし、ここに示した温度分布は加熱面の上方5mmの位置において測定した結果であり、検定法としてはスプライン法を適用した。ここに、図10(a)は領域分割なし(1×1)の結果、図10(b)は領域分割(10×10)の結果である。いずれの結果においても、良く知られているように、加熱壁近傍にはセル状構造⁶⁾が発生していることがわかる。しかしながら、両結果を比較すると、画像周辺において温度の計測値に相違が認められ、目視角度の影響を示す。図10(b)によると、セル状構造線に沿って高温部が連なっており、また、構造線の結び目ではさ

らに温度の高い領域が観測される。一方、PIV法によって同時に測定した同一水平断面内の速度分布を図10(c)に示す。この結果によると、セル状構造線に沿って流体の移動が認められること、ならびにそれらの結び目に向う流れが発生していることがわかる。したがって、セル状構造線の結び目付近からプルームが発生し、それによる上昇流が形成されることになる。

図11(a), (b), (c)は、同様に、熱対流実験における上側断熱壁付近(壁から5mm)の温度分布と速度分布の同時測定結果である。図11(a), (b)の比較から明らかなように、目視角度を考慮した図11(b)の結果は、より一様な温度分布を示しており、上側境界が断熱条件に近いことを示唆する。ただし、部分的にはわずかな高温領域が数箇所形成されていることがわかる。ただ

し、これらの位置は、図10のセル状構造線の結び目位置に近く、加熱面から発生するプルームの影響による高温部であると考えられる。一方、図11(c)に示す速度分布によると、プルームが上側壁の高温部から周囲に広がる様子が認められる。したがって、加熱面と断熱面付近の熱的組織構造はプルームを通して強い相関があることになる。このように、分割検定法による温度計測ならびに同時速度計測は、乱流熱対流における組織構造解明に有効な手段を提供する。

4. 結 論

感温液晶粒子を用いた温度場の可視化結果を定量化する際に、目視角度の影響を考慮して温度場を高精度で計測する方法について検討し、さらに熱対流場における温度・速度の同時計測へ応用し、以下の結論を得た。

- (1) 一様温度画像を用いた感温液晶の色・温度検定実験を行い、目視角度の影響を考察した。本実験の感温液晶ではH値の低温側ならびにS値の全温度域で目視角度の影響が強く現れた。
- (2) 目視角度の影響をニューラルネットワーク検定ならびにスプライン検定に取り入れるため、領域分割検定法ならびに平滑化を導入した。いずれの検定においても領域分割数の増加とともに目視角度の影響が急激に減少すること、ならびに平滑化による温度評価誤差の低減を示した。
- (3) ここに提案するスプライン検定法は、点検定、面検定のいずれにおいてもニューラルネットワーク検定より高精度の温度検定が可能であり、かつ学習時間がかなり短縮できるため目視角度を考慮した分割検定に有効である。

(4) 下面加熱の条件下における水平流体層内の温度場を感温液晶で可視化し、スプライン分割検定を適用して温度分布を測定した。また、同時測定した速度分布結果も併せて熱対流現象を考察し、加熱面付近に形成されるセル状構造線の結び目にあたる高温部からプルームが上昇すること、ならびに上側の断熱壁付近ではより一様な温度分布を示すがプルームによる影響が強く認められることを示した。

終りに、本研究を進めるにあたり協力された当時群馬大学大学院学生の中林貴光君ならびに新潟大学工学部学生の斎藤竜史君に謝意を表す。

文 献

- (1) Rhee, H. S. et al., *Exp. Fluids*, 2(1984), 57-64.
- (2) Wilcox, N. A. et al., *Proc. Phys. Numer. Flow Vis.* (1985), Albuquerque, 65-74.
- (3) 秋野のり夫・ほか2名, *機論*, 54-505, B(1988), 2661-2669.
- (4) 木村一郎・ほか2名, *計測制御論*, 27-8(1991), 870-877.
- (5) Dabiri, D. and Gharib, M., *Exp. Fluids*, 11(1991), 77-86.
- (6) 藤沢延行・Adrian, R. J., *機論*, 63-607, B(1997), 818-823.
- (7) Kimura, I., Kuroe, Y., and Ozawa, M., *J. Flow Vis. Image Process.*, 1(1994), 261-269.
- (8) Fujisawa, N. and Adrian, R. J., *J. Visualization*, 1-4(1999), 355-364.
- (9) Kasagi, N., Moffat, R. J., and Hirata, M., *Handbook of Flow Visualization* (Ed. Yang, W. J.), 1989, Hemisphere, 105-124.
- (10) Kobayashi, R., Saga, T., and Doh, D., *Proc. 2nd Int. Workshop PIV* (1995), Fukui, 33-43.
- (11) Nozaki, T., Mochizuki, T., and Mori, Y. H., *Exp. Fluids*, 18, 137-144.
- (12) 池田貞之、亀岡利行, *可視化情報*, 19-73(1999), 135-140.
- (13) Fujisawa, N. et al., *Proc. ASME Heat Transfer Div.*, 5(1998), Anaheim, 537-543.
- (14) 藤沢延行・堀陽一, *機論*, 63-606, B(1997), 590-595.