

感温液晶を用いた温度場の3次元計測と乱流熱対流研究への応用*

藤 沢 延 行*¹, Ronald J. ADRIAN*²Three-Dimensional Temperature Measurement
by Liquid Crystal Thermometry and Its Application
to the Study of Turbulent Thermal Convection

Nobuyuki FUJISAWA and Ronald J. ADRIAN

A new calibration technique of liquid crystal thermometry has been introduced to the quantitative measurement of temperature in a thermal fluid and applied to the study of turbulent thermal convection. The present calibration technique improves the accuracy of temperature measurement in comparison with the classical calibration technique with hue. Three-dimensional temperature measurement of turbulent thermal convection over a horizontal smooth surface is carried out at a flux Rayleigh number of 3×10^9 by scanning a light sheet normal to the image plane and capturing a number of sequential visualized images. The spatial temperature distributions of thermal plumes over a horizontal surface are demonstrated by the reconstruction of isothermal contour surfaces and various cross-sectional views of the plumes. These results indicate the presence of a polygonal cell structure close to the surface and the generation of plumes at the intersections of high-temperature lines.

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

1. 緒 言

流体中の温度分布を測定することは工学上重要な課題であり、過去より温度計測やその計測精度の改良についての多くの研究が行われている。しかしながら、実用的には熱電対による温度測定に代表されるように点計測が一般的であるため、流体中の任意断面あるいは任意空間中における温度分布を知るにはかなり多くのプローブの挿入が必要があり、そのため流れ場を乱すなどの問題がある。これに対し、感温液晶を用いた温度場の可視化は非接触での多点同時計測が可能であり、将来的には3次元空間の温度場の実時間計測に実用化できる可能性もある。感温液晶を用いた温度計測に関する過去の研究としては、流体中の速度場と温度場を定性的に可視化観察した報告⁽¹⁾を初めとして、カラー写真技術⁽²⁾やフィルタとモノクロ CCDカメラ⁽³⁾を組み合わせて感温液晶の呈色を定量化する試みがなされている。その後、カラー CCDカメラが一般に普及したこともあり、そのRGB出力に基づいて感温液晶の呈色

と温度との関係を検定することがしばしば行われている^{(4)~(8)}。ここに、感温液晶から得られるRGB信号はいずれも温度変化に対し強い非線形性を示すため直接温度検定することは困難であり、他の色空間に変換してその非線形の程度を弱めるか^{(5)~(8)}、ニューラルネットワークによってRGB信号と温度との関係を線形化させるか^{(9)~(11)}のいずれかの方法が採られる。前者の方法の中では、感温液晶の呈する色のRGB信号をHSI色空間に変換し、ヒューと温度との関係を検定曲線として用いる方法がもっとも一般的であり⁽⁵⁾、またその応用例も多い^{(6)~(8)}。

乱流熱対流は、地球規模の大気乱流における熱機構に関わる工学上重要な課題である。しかしながら、その熱機構解明においては、乱流の組織的構造に関わるため、瞬時3次元温度場を計測し熱輸送現象の詳細を明らかにすることが必要である。これまでの研究は、レビュー論文⁽¹²⁾に見られるように、その温度場と速度場の時間平均的特性を取り扱った実験と乱流モデルを用いた計算が盛んである。一方、最近になって、ラージエディシミュレーション⁽¹³⁾や直接シミュレーション⁽¹⁴⁾による対流構造の研究も報告されており、対流発生の物理機構が徐々に明らかにされつつある。しかしながら、直接シミュレーションでは、依然として

* 原稿受付 1996年5月23日。

*¹ 正員、群馬大学工学部 (〒376 桐生市天神町1-5-1)。*² イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校 (Urbana, IL, 61801, USA)。

十分大きなフラックスレレー数での計算は困難であり、またこれらの数値計算で得られた結果を検証するうえでも、そのような熱対流現象の3次元構造的解明が待たれる。

本研究では、2種の感温液晶の色-温度特性を HSI 色空間において考察し、ヒュー-とインテンシティを用いた高精度検定法を提案すると共に、スリット光を移動することによって3次元空間内の温度分布を計測する方法について検討する。また、それを応用して、水平滑面から発生する熱対流現象の3次元温度計測を行った結果を併せて報告する。

2. 実験装置および方法

本実験に使用した感温液晶はキラルネマチック液晶であり、それは平均直径が10~15 μ mのマイクロカプセル化された粒子状になっている。この種の感温液晶はコレステリック液晶より強い呈色強度が得られることで知られており、温度場の可視化に適する。この液晶を作動流体である蒸留水中に重量パーセントで0.0015%加えて、流体中の温度場の可視化を行った。なお、この重量パーセント値は種々異なる量の感温液晶を加えた予備実験の結果、もっとも良好な呈色が得られた最適値である。実験に使用した感温液晶は、赤の呈色温度が32 $^{\circ}$ Cで温度範囲が2 $^{\circ}$ C(R32C2W)のものとそれらが29 $^{\circ}$ Cと4 $^{\circ}$ C(R29C4W)の2種である。これらの感温液晶の色-温度検定は、容積が158mm \times 148mm \times 100mmの小型水槽を用いて行った。この水槽は、側面と上面がアクリル製で底面と枠組みがステンレス製の容器である。検定実験は、感温液晶を供試水中に加えたのち一定時間後に設定した温度まで加熱し、その後攪拌しながら自然冷却によって一様な容器内流体温度を設定し、感温液晶の色と基準温度との関係を検定した。なお、基準温度の測定には白金抵抗線温度計を使用した。その温度分解能は $\pm 0.01^{\circ}$ Cである。ただし、本実験に使用した感温液晶においては、呈色変化が経過時間の影響を受けることが予備実験の結果明らかとなったため、供試流体の準備から検定までと準備から温度測定実験までの時間を固定した。ここでは、その時間を1時間に固定して実験した。なお、これは感温液晶の温度による劣化によると考えられるが、呈色温度範囲の狭い感温液晶ほど強い影響が見られた。

熱対流の実験装置は、図1に示すように、内寸法508mm \times 508mmの正方形の水平断面を有する容器であり、その容器に水位100mmまで流体を加え、さらにその上側に高さ調整の可能な蓋を取り付け、また気泡が入らないようにして実験を行った。ただし、この上蓋と装置の

側壁は、境界面における熱の流出を抑制することと温度場の可視化観察を考慮して透明のアクリル製とし、底面にアルミニウム製の平滑板を取り付けてある。その下側には加熱用のヒータマットを備え付けた構造となっており、平滑板上には一様な温度分布が得られる。なお、撮影面を除く3側面はさらに100mmのウレタン材で覆い、熱の流出を極力小さくしている。したがって、本実験では、下面を一様加熱、側面および上面はほぼ断熱条件であるので、容器内の温度は時間とともに漸増することになる。実験は、流体の高さ方向中央付近の温度を水銀温度計で読み取り、その温度上昇が一定勾配になるのを待って3次元温度計測実験を行う。なお、予備実験の結果から、一定の温度上昇勾配を得るのに加熱後30分程度要することがわかっている。照明は、装置側方に置かれたスライドプロジェクタからのスリット光を用いた。この光は検定装置あるいは実験装置の上側に固定された鏡で反射し装置上方から入射するようにしてある。ただし、本実験では2枚のナイフエッジで高精度のスリットを製作し、測定部でのスリット光厚さを約2mmとした。

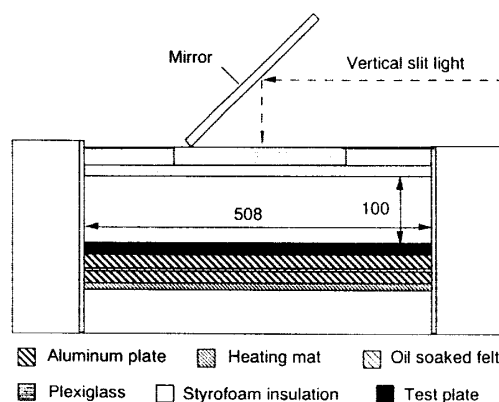


Fig.1 Thermal convection test section

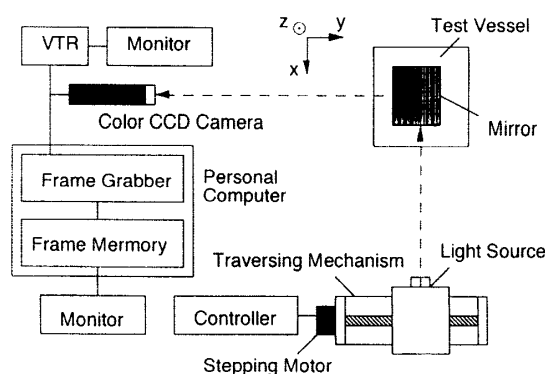


Fig.2 Experimental set-up

図2は、感温液晶の検定ならびに3次元温度計測実験に用いた画像計測装置の概略である。ただし、ここでは測定部における3次元空間の温度情報を得ることが目的であるため、スリット光の位置をステップモータで移動可能とした。そのスリット光移動時における二次元可視化画像は、スリット光面に垂直方向に置かれたカラーCCDカメラで連続的に撮影され、それらの画像情報はフレームグラバでデジタル化したのちコンピュータのラムメモリ(32MB)に格納される。その際カメラのRGB出力は、各々512x480画素x8ビットの空間分解能と精度でデジタル化される。本実験では、熱対流実験装置の中央部の空間体積 $\Delta x \Delta y \Delta z = 120 \times 48 \times 100 \text{ mm}^3$ における3次元温度計測を行った。1枚の画像からは、スリット光によって照明されたx-z平面($\Delta x \Delta z = 120 \times 100 \text{ mm}^2$)のy方向厚さ2mmの温度情報が得られることになるが、スリット光がy方向へ一定速度で移動するため、このような輪切りにされた画像情報が $\Delta y = 48 \text{ mm}$ の区間に渡って逐次得られることになる。ここでは、スリット光の移動速度7.2mm/sec、総画像枚数25枚で実験を行った。このとき、スリット光が $\Delta y = 48 \text{ mm}$ の区間移動するのに7秒程度要するため、得られる3次元温度情報がスリット光の移動時間の影響を受けることが予期されるが、ここで対象とする熱対流現象では速度変動の大きさは2mm/sec程度⁽¹²⁾と小さく、それによる対流構造の変形はさほど大きくはないものと推定する。一方、使用したCCDカメラには望遠レンズを取り付け、カメラはスリット光による可視化断面の位置から約2mの位置に固定した。このとき、感温液晶の呈する色は目視角度の影響を受けることが予期されるが、本実験ではカメラ中心に対する上下方向の目視角度は $\pm 1.4^\circ$ 以下と小さく抑えたため、その影響はほとんど認められなかった。ただし、入射光の輝度分布の非一様性の影響が画像上により顕著に認められたため、その補正

を行なった。すなわち、本画像の輝度分布を同一位置で得られた呈色温度外の輝度画像で除し、さらに本画像の中央付近の一定の輝度値を乗ずることで行った。

3. 結果および考察

3-1 感温液晶の検定 図3は、本実験に用いた感温液晶の光学特性をHSI色空間で温度検定した結果であり、ヒューH(a)、サチュレーションS(b)、インテンシティI(c)の各測定結果を示す。図の縦軸は、いずれも測定結果を256分割の階調表現で表した結果である。また、図には数回の検定を行った際のデータのばらつきをエラーバーとして示した。いずれの感温液晶においても、ヒューHの温度変化は低温域では極めて強い温度依存性を示すが、高温域では温度依存性はかなり小さくなる。ごく低い温度範囲を除くと、Hと温度Tの関係は単調増加傾向を示しており、ヒュー検定法の有効性が見られる。なお、Hの値は、赤を0として0~255の範囲で定義されることが一般的であるため、図のようにHが負となる範囲は検定の対象外となる。しかしながら、Hの定義範囲を、たとえば-55~200で再定義すれば、より広い温度範囲で検定が可能であるといえる。ただし、低温側のH値(-70あるいは186)と高温側のH値(180)がかなり接近するため、依然としてHのみによる高温と低温の温度の判別は困難であると考えられる。一方、サチュレーションSの温度特性によると、ヒューHと比べかなり強い非線形特性が見られ、また変化幅が小さい割にデータのばらつきが大きいので、温度の高精度検定には不向きな面を示す。しかしながら、Sの温度特性は、低温側ではSの絶対値は小さく高温側では大きな値を示すため、Hの温度特性では困難であった呈色の高温側と低温側の温度判別が、このSの温度特性を併用することで可能となるといえる。他方、インテンシティIの温度特性は、低温側では温度と共に増大するが、高

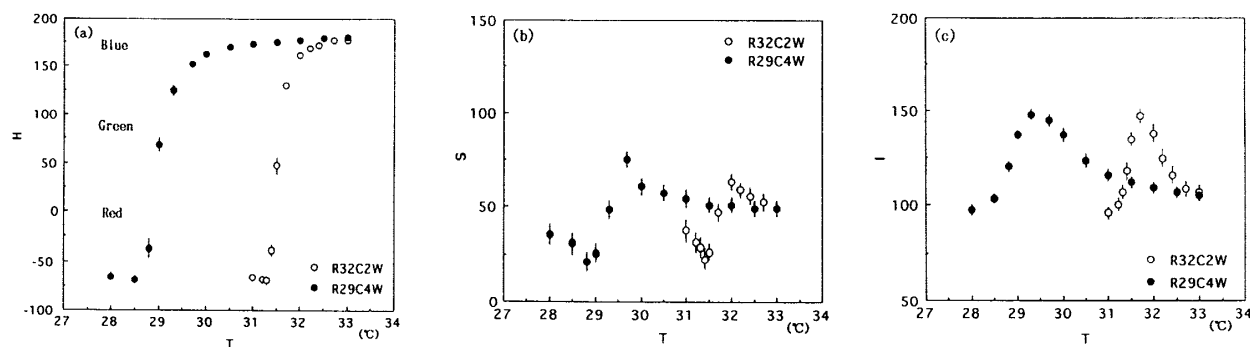


Fig.3 Optical characteristics of liquid crystals
(a) Hue, (b) Saturation, (c) Intensity

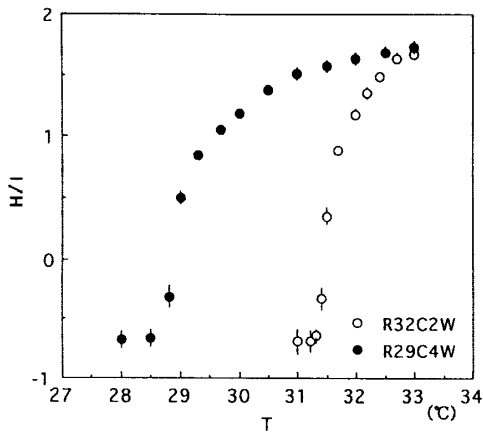


Fig. 4 Hue/Intensity versus temperature T

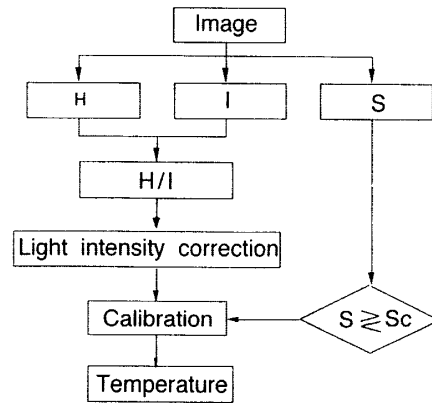


Fig. 6 Block diagram of temperature measurement

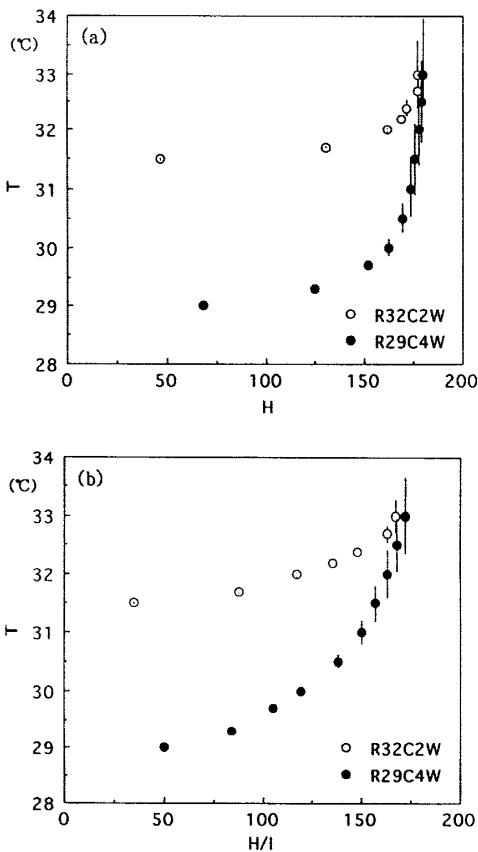


Fig. 5 Calibration curve and uncertainty
(a) Hue, (b) Hue/Intensity

温側では減少傾向にあり、ヒュー-Hよりかなり広い温度範囲で温度依存性を示すことがわかる。したがって、この高温側での温度依存性を用いれば、温度検定の精度を向上させることが可能である。

図4は、新たなパラメータとしてヒュー-H/インテンシティIを算出し、それと温度Tとの関係を示した結果で

ある。図3(a)のHの温度特性図と比べると、低温域での温度依存性は多少低下するが依然として十分な温度依存性が得られており、また高温域では温度依存性がかなり向上する。この高温域での温度依存性の向上は、図3(c)に示すように Iの温度依存性が高温側でも大きいことによる。したがって、H/I検定を用いると、より広い温度範囲で良好な温度依存性が得られることがわかる。また、H/Iと温度Tの関係においては、全温度範囲に渡り単調増加傾向が得られており、H検定の長所は保存される。

図5(a), (b)は、それぞれ、H検定およびH/I検定における検定温度の不確か性を示した結果である。これらの結果は、H検定 (図3(a))およびH/I検定(図4)の各エラーバーに対しそれらの温度勾配を用いて算出した温度の不確か性の大きさを示す。図(a)からわかるように、いずれの感温液晶でもH検定の高温域においては、温度依存性が小さくなるためかなり大きなエラーバーが現われている。しかしながら、図(b)のH/I検定結果によると、温度が上昇するとエラーバーが増大する傾向はヒュー検定と同様であるが、エラーバーの幅はかなり縮小されており、温度検定の不確か性が減少することは明らかである。これに伴って、温度検定に使用可能な感温液晶の呈色温度範囲は本検定によって拡大することになる。

図6は、本研究で提案する感温液晶の検定法を用いた温度計測のフローチャートである。すなわち、感温液晶によって可視化された画像のRGB出力はHSI色空間に変換後、HとIの画像に画面間演算を施すことによってH/Iの画像を得る。この画像に対し、輝度分布の補正とH/Iの温度検定曲線を適用して、画像の各画素ごとの温度を求める。ただし、H/I画像においても、H画像の場合と同様に、検定曲線の両端温度に相当するH値が1周

期異なるH値に接近するため、高温と低温の区別は困難となる。そのときは、サチュレーションSがある閾値(たとえば45)より大きい場合は高温側、小さい場合は低温側として判別する。

3・2 乱流熱対流における3次元温度計測 図7は、本実験装置測定部の中央付近で得られた熱対流現象の2次元画像25枚を本手法によって解析した結果を3次元可視化用のソフトウェア(テクプロット)により等温度面の立体的構造を陰影表示で再構築した可視化結果の一例である。ここに、 31.6°C の等温度面を示す。なお、感温液晶としてR32C2Wを使用した。ただし、座標は加熱面中央を $x=60\text{mm}$, $y=24\text{mm}$, $z=0\text{mm}$ とした。図からわかるように加熱された水平面上には、さまざまなプルーム構造が形成され、浮力によってそれらは上方へ移動する。このようなプルームは、加熱面付近に5~6個観測

されるが、数回の実験の範囲では、観測されるプルーム数やプルーム高さなどの特徴は様々である。

図8は、図7に示した温度分布の中で $y=24\text{mm}$ の位置にあたるプルーム断面の温度分布を示した結果である。ここでは、 x - z 断面における等温度域(帯域幅 0.2°C)をグレー表示し、またその中央温度値($^{\circ}\text{C}$)を図中に数字で示した。図から明らかなように、プルーム内部の温度は周囲より高く、特に平滑面近傍には高温域があり、その熱が上方へ対流するにつれて冷やされていく様子がわかる。

図9は、図8の破線で示したプルーム付近の温度分布を、種々の y 断面について示した結果である。ただし、図9(b)は図8の破線内と同一結果である。同様に、図10および図11は、それぞれ、プルームの種々の x 位置における y - z 断面図および種々の z 位置における x -

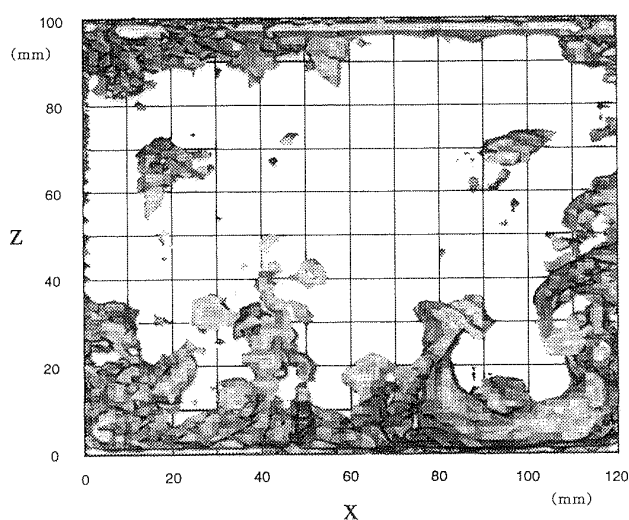


Fig. 7 Reconstructed isothermal surfaces of thermal convection at $T=31.6^{\circ}\text{C}$

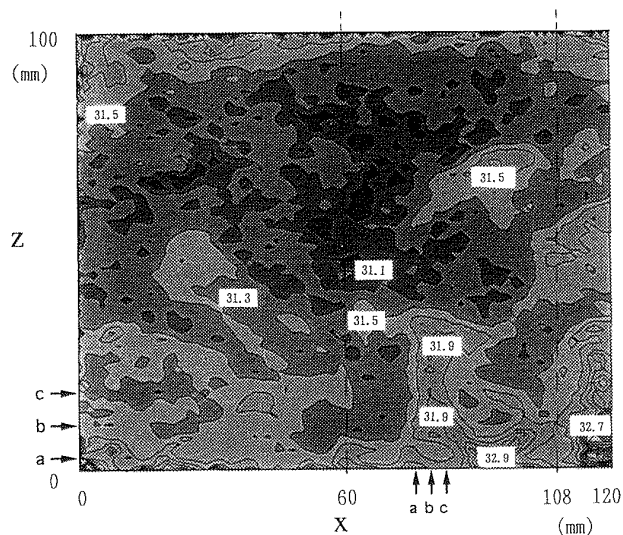


Fig. 8 Temperature distributions of thermal convection in x - z plane and $y=24\text{mm}$ (Unit in $^{\circ}\text{C}$)

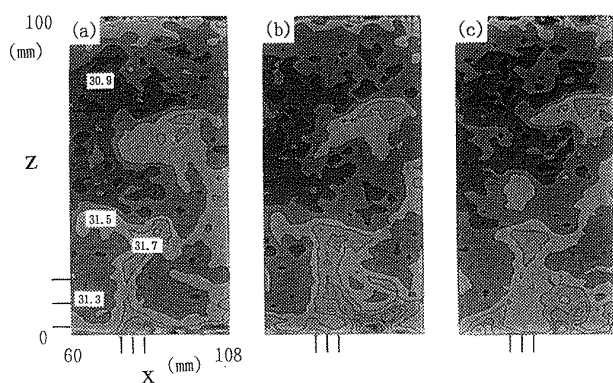


Fig. 9 Cross-section of temperature distributions in x - z plane (Unit in $^{\circ}\text{C}$)
(a) $y=20\text{mm}$, (b) $y=24\text{mm}$, (c) $y=28\text{mm}$

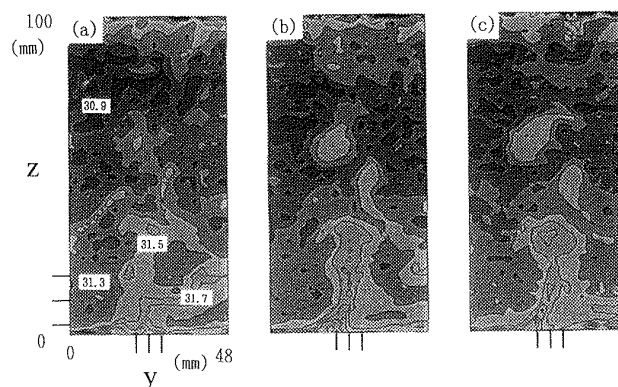


Fig. 10 Cross-section of temperature distributions in y - z plane (Unit in $^{\circ}\text{C}$)
(a) $x=75\text{mm}$, (b) $x=79\text{mm}$, (c) $x=82\text{mm}$

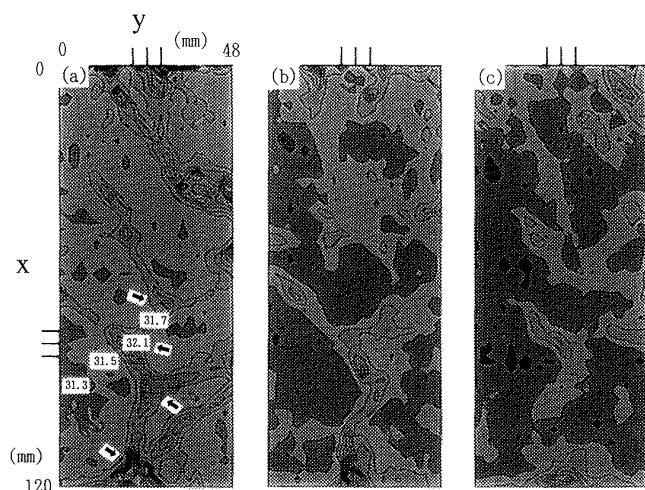


Fig.11 Cross-section of temperature distributions in x-y plane (Unit in $^{\circ}\text{C}$)

(a) $z=3\text{mm}$, (b) $z=10\text{mm}$, (c) $z=18\text{mm}$

y断面図である。ここに、図10と図11に示した断面図(a), (b)(c)の位置を図8に記号a, b, cで示し、また、図9~図11には他の断面位置を図周囲に線で示してある。図9(a)によると、図7の $x=100\text{mm}$, $z=70\text{mm}$ 付近に認められた島状の高温域は、それ単独で存在するのではなく、平滑面から発生した周囲のプルームの3次元構造に結び付けることができる。このように、平滑面から発生したプルームは、周囲空間に発生した速度や温度の変動によって上昇過程をさまざまに影響されながら発達するため、その空間的構造はかなり複雑である。一方、図11によると、加熱面から離れた図(c)では、プルームの断面図9, 図10に相当する島状の等温域が形成されており、温度分布の形状もかなり不規則的である。しかしながら、加熱面に近づくにつれ、筋状の高温域がかなり鮮明に見られるようになり、乱流熱対流実験の速度場の可視化で認められた多角形のセル構造⁽¹⁵⁾と類似の熱構造が発生していることを示唆する。ここに、本実験におけるフラックスレレー数は $R_{ar} (= \beta g Q h^4 / \kappa^2 \nu) = 3 \times 10^9$ であり、実験室レベルとしては大きい。ただし、 β : 体積膨張率、 g : 重力加速度、 Q : 熱流束、 h : 流体の高さ、 κ : 熱拡散係数、 ν : 動粘度である。一方、図11(a)から明らかなように、筋状構造の結び目にあたる位置(図中の矢印)ではさらなる高温部が形成されており、その結び目位置からプルームが上昇することが図9と図10の断面温度分布図との対比からわかる。このように、本論文で示した感温液晶を用いた3次元温度計測法は、乱流熱対流研究に新たな知見を提供しており、さらなる改良によってその対流構造の詳細を解明することが可能であるといえる。

4. 結 論

感温液晶による温度場の可視化と画像計測によって流体内の3次元温度分布を計測する方法を示し、また、それを乱流熱対流実験に適用し、以下の結論を得た。

(1) 感温液晶の温度検定法としてHSI色空間におけるH/Iをパラメータとする検定法を提案し、過去のH検定と比べ温度検定の不確かさが減少することを示した。

(2) スリット光の移動時における温度場の2次元画像情報を連続的にデジタル化し、それらにH/I検定を適用することによって定量化し、さらにソフト的に再構成することによって3次元空間内の温度分布を定量的に可視化する方法を示した。

(3) 一様な一定熱流束条件下の水平滑面上に発生する乱流熱対流実験を行い、その実験装置内の3次元温度分布を本手法によって計測した。得られた結果から、加熱面上に形成されるプルームの3次元形状やプルーム内の各断面内温度分布を明らかにした。

(4) 乱流熱対流実験において加熱面近傍の水平断面内温度分布を観測すると、筋状の高温部が認められ、それらの筋の合わさった結び目ではさらに高い温度領域が現われ、プルーム発生の熱源を形成することがわかった。

最後に、本研究に対し有益な助言を戴いたイリノイ大学リチャード・キーン博士に感謝の意を表す。なお、本実験は、著者の1名が文部省在外研究員としてイリノイ大学に滞在中に行ったことを記して謝辞とする。

文 献

- (1) Rhee, H.S. et al., *Exp. Fluids*, 2(1984), 57.
- (2) Wilcox, N.A. et al., *Proc. Phys. Numer. Flow Vis.*, Albuquerque, USA, 1985, 65.
- (3) 秋野・ほか2名, *機論*, 54-505, B(1988), 2661.
- (4) 木村・ほか4名, *計測制御論*, 27-8(1991), 870.
- (5) Dabiri, D. and Gharib, M., *Exp. Fluids*, 11(1991), 77.
- (6) Ozawa, M. et al., *Exp. Fluids*, 12(1992), 213.
- (7) Gluckman, B.J., et al., *Phys. Fluids A*, 5(1993), 647.
- (8) Nozaki et al., *Exp. Fluids*, 18(1995), 137.
- (9) Kimura, Kuroe, Ozawa, J. *Flow Vis. Image Process.*, 1(1994), 261.
- (10) Kobayashi et al., *Proc. Int. Workshop PIV, Fukui, Japan*, 1995, 33.
- (11) 篠木・ほか3名, *可視化情報*, 15 Suppl.1(1995), 177.
- (12) Adrian, R.J., et al., *Exp. Fluids*, 4(1986), 121.
- (13) Schmidt, H. and Schumann, U., *J. Fluid Mech.*, 200(1989), 511.
- (14) Balachandar, S., *Phys. Fluids A*, 4(1992), 2715.
- (15) Willis, G.E. and Deardorff, J.W., *J. Geophys. Res.*, 84(1979), 295.