自然対流場の 3 次元画像温度計測*

小澤 守**, 篠木 政利***, 木村 一郎†, 梅川 尚嗣††

3-D Temperature Measurement of Natural Convection by Image Processing Technique

Mamoru OZAWA, Masatoshi SHINOKI, Ichiro KIMURA and Hisashi UMEKAWA

ABSTRACT

This paper described quantitative 3-D measurement of temperature field of a rotating Rayleigh-Benard convection in a cylindrical cell heated below and cooled above. The temperature field was visualized by using a thermo-sensitive liquid-crystal tracer, and the temperature distribution was obtained by applying the color image processing to the visualized image. The neural network was applied to the color-to-temperature calibration. On the basis of the obtained two-dimensional temperature distribution in vertical planes, the 3-D temperature field in the cell was successfully reconstructed.

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

1. 緒 言

自然対流をはじめとする熱流動現象の実験的解明には流体の温度分布を測定することが不可欠である。近年、熱流動場の可視化技術が大きく進展し、特に温度分布計測に関しては感温液晶が広範囲に用いられるようになっている^{1)~4)}。感温液晶に関しては液晶フィルムを用いるものもあるが、自然対流を対象とする場合には、マイクロカプセル化した液晶粒子を流体内に懸濁して、温度場を可視化するいわゆる感温液晶懸濁法が代表的である。これら可視化技術とコンピュータによる画像処理技術を併用することによって温度場の定性的な観測、理解だけでなく、温度分布の定量計測、あるいは複数の画面間の相関をとることによって速度測定を含めた、温度-速度の同時計測が可能になっている^{3),5)}。

ところで著者らが既報^{3),4)}で対象とした Hele-Shaw セル内自然対流のように容器を構成する壁の効果が極めて大きく、流れ場としては 2 次元の形態を取るものはかなり特殊で、通常の自然対流に対してはその構造を明らかにするために 3 次元 (3-D) 計測が必要不可欠である。3 次元計測としては鏡を使うなどして異なった方向から

の複数の画像を同時に求める方法が用いられ、また放射線計測の場合には CT 技術などが用いられている。最近では中性子ラジオグラフィを用いて金属で構成された燃料集合体内のボイド率分布計測に関して顕著な成果が報告されている⁶⁾。

一方、感温液晶懸濁法は元来、流れ場のある一断面の面計測であるから、これを用いて 3-D 計測をするには、観測のために流れ場内に形成される光のシートを順次移動させて得られた各画像間をなんらかの方法で補間するだけでよいが、各画像間に時間的なずれが存在することから高速で画像を収録するか、さもないと対象が定常現象に限られるのは当然である。光のシートを平行移動させることによって流れ場の 3 次元構造を観察した試みは、既に著者らによって報告されている⁷⁾が、得られた画像を用いて画像処理による定量化を行うには、カメラの焦点深度や画角の変化など種々の問題が存在する。

そこで本研究では、観測面を固定した状態で内部の流れ場が観測できる代表例として透明な回転容器内の定常的な自然対流現象に感温液晶懸濁法とカラー画像処理技術を用いて温度場の 3-D 計測を試みた。カラー画像処理においては、非線形性の強い可視化画像の色情報と温度の関係ニューラルネットワークを用いて定式化し、色/温度変換を行った。

2. 可視化実験装置とカラー画像処理システム

可視化実験に用いられた透明アクリル樹脂製の回転自

* 原稿受付 1996 年 1 月 30 日

** 正会員 関西大学工学部

*** 関西大学大学院

† 正会員 大阪電気通信大学電子機械工学科

†† 関西大学工学部

Fig.1 Experimental setup.

自然対流実験装置の概要が Fig.1 に示されている。モータ、減速機、ベルトによって駆動される円筒形の容器内に形成された流体層①はアスペクト比(半径/高さ) 50 mm/50 mm で、その上面に 2 mm 厚の亚克力板②、下面に 25 mm 厚の銅板③を伝熱面とする水槽がそれぞれ設置されており、恒温水循環装置からの一定温度の水を循環させることで上下面温度が設定される。この流体層には感温液晶パウダーを 0.1 wt% 程度懸濁したシリコンオイルが満たされている。温度場の可視化断面は容器の中心軸を通る垂直平面で、装置側方に置かれたハロゲンランプからの白色光と幅 7 mm のスリットによって形成される。TV カメラによる撮影は可視化断面に直交する、装置前方 2 m の位置から行った。スリット幅を 7 mm と比較的大きくしたのは撮像系の感度の都合による。本実験で対象とした容器が比較的大きく、対流の構造も比較的簡単で周方向に温度勾配が大きくないことから、このスリット幅は 3-D 計測に対して大きな問題にならない。なお可視化に用いられた感温液晶パウダーは日本カプセルプロダクツ社製のコレステリック系混合液晶パウダー(R-20)である。マイクロカプセルの粒子径はたかだか 20 μm で、その温度応答はミリ秒のオーダーであるため定常状態を対象とした回転速度が比較的遅く、画像収録時間が比較的長いことでの計測にはなんら問題を生じないと考えている。またシリコンオイルは信越シリコン KF 96-100 cSt である。

画像処理システムの構成が Fig.2 に示されている。撮像系の感度の都合からシャッター速度を 1/60s とし、撮

Fig.2 Image processing system.

影された可視化画像は 1/30 s 間隔で光ディスクレコーダに記録される。さらに、その画像は光ディスクレコーダ内の色復調回路で R, G, B それぞれ 8 bit の信号に色分解され、イメージプロセッサに記録される。この画像データはワークステーションによって演算処理され、その結果はグラフィックディスプレイに出力される。

3. ニューラルネットワークによる色/温度変換

ここで行った温度計測法は色/温度の構成関係を用いた相対測定である。したがって温度場の定量計測を行うためには、感温液晶の呈色と温度の関係を実際の測定対象の撮像と同じ条件のもとで行った校正実験によって求める必要がある。本研究では自然対流実験を含めた一連の実験の中で、自然対流実験での温度設定とは逆に、上面を高温に、下面を低温に設定して温度成層を形成し、シース径 0.5 mm の K-熱電対を容器中心軸に沿って上部から下部に向かって順次トラバースして成層各所の温度を計測するとともに、TV カメラによって熱電対を含む成層の画像を順次収録した。Fig.3 は下面温度 14.7°C、上面温度 18.3°C と設定したときに得られた温度成層の原画像である。下層の低温側から上層の高温側に向かって赤、黄、緑、青と呈色が変化している。この原画像を用いて熱電対による各測定点の周辺の水平方向には 25 画素、垂直方向には熱電対を含み、しかしできるだけ薄くして 3 画素(本実験条件における空間分解能は水平方向に 0.24 mm/pixel、垂直方向に 0.34 mm/pixel である)の平均値として R, G, B 値を求めた。なお熱電対の測定感度は 0.1 K 程度であり、垂直方向 3 画素での温度変化は今の場合 0.07 K 程度と予想され、感度に比べて十分小さな値となっている。また水平方向に 25 画素としたのは積分平均値を十分有意なものとするため試行錯誤的に決定した。この R, G, B 値を次式によって正規化した r, g, b 値と温度の対応関係が Fig.4 に示されている。

$$\begin{aligned} r &= R / (R + G + B), \quad g = G / (R + G + B), \\ b &= B / (R + G + B) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで R, G, B 値ではなく正規化された r, g, b 値を用いたのは、同一観察面においても光源からの距離によって明度が異なり、その影響を取り除く必要があった

からである。

r, g, b 値と温度の関係に基づいて色/温度変換の関数関係を求める際には既報^{3),5)}のようにマンセル表色系に従って色相を算出し、この色相と温度の相関式を用いて色/温度変換を行うことも可能である。しかしニューラルネットワークを用いれば、色相ではせいぜい2 K程度であった測定範囲をさらに大きく広げることが可能である⁸⁾ので、今回はFig.5に示すニューラルネットワークを用いて色/温度変換を行うこととした。

ここで用いたニューラルネットワークは r, g, b 値を入力とし、温度 T_N を出力とする4層構造の階層型ニューラルネットワークで、各層のユニット数はFig.5に示すとおりである。なお既報⁹⁾では呈色が良好な感温液晶フィルムを用いたため3層構造のネットワークで十分な学習効果を得ることができたが、今回の懸濁法では3層構造では対応できず、4層構造にしなければ所定の学習効果を得ることができなかったことを付記しておく。

ある r, g, b 値に対するニューラルネットワークの出力 T_N が校正実験によって得られた温度 T_R と一致するように、バックプロパゲーション法を用いて学習を行っ

Fig.3 Visualized image of thermal stratification.

Fig.4 Relationship between r, g, b and temperature.

Fig.5 Neural network structure.

た。学習データとしては14.7°Cから18.3°Cまで0.25 K間隔の14パターンを用いた。Fig.6に学習回数と出力温度の実際の温度に対する標準偏差が示されている。学習回数が500回を越えると標準偏差は急速に小さくなり、30000回を越えるとあまり大きな変化が認められない。そこで本研究においては学習回数を若干の余裕を含めて50000回と設定した。

Fig.2の温度成層の原画像の各画素に対してこのニューラルネットワークを用いて色/温度変換した結果を疑似カラー表示したものがFig.7に示されている。なお表示に際しては色覚に合うように低温から高温に向かって青、緑、黄、赤と感温液晶の呈色とは逆の順序で色が設定されている。Fig.7から明らかなように実際の可視化画像には多くのノイズが含まれているため、Fig.7の温度分布画像に対してラスタ操作によって周囲7×7画素によるメディアンフィルターをかけた結果がFig.8に示されている。これによってノイズが効果的に除去され、また温度の画像情報もほとんど変形を受けていないことが分かる。

4. 回転系自然対流への適用

本実験で用いた容器は円筒形で、内部に液体を充填していることから屈折率の違いによって画像が水平方向に

Fig.6 Standard deviation of output temperature.

Fig.7 Iso-thermal contours of thermal stratification.

Fig.8 Iso-thermal contours after median filtering (Color-to-temperature relationship is indicated in Fig.7).

変形を受ける。可視化画像を再構成する際には液体と空気の屈折率を用いて幾何光学的に補正をすることも可能であるが、ここでは最も簡便な方法として、シリコンオイルを充填した容器内の観測断面に方眼紙を設置し、これを可視化実験と同じ位置から TV カメラで撮影することによって水平方向への変形の関係式を求めた。この式を用いて実際に得られた可視化画像の水平方向座標を線形的に変換することによって画像を再構成した。

次に上記の画像計測システムを回転数 10.1 rpm, 上面壁温 15.6°C, 下面壁温 17.9°C の条件下 (レイリー数 $Ra = 2.55 \times 10^5$, 回転レイノルズ数 $\Omega = 4.21$) での自然対流の温度分布計測に適用した結果について述べる。テスト容器が回転することで、スリット光が通過する断面の可視化画像を 1 回転あたり 178 枚得ることができる。前述のようにシャッター速度は 1/60 s で、この間に容器外周部で 0.9 mm 程度移動することになるが、この大きさはスリット幅よりも十分に小さい値である。先にも述べたようにこの画像収録時間は液晶の温度応答に対しても十分の長さである。

周方向の各断面の画像情報に校正実験結果に基づいて学習させたニューラルネットワークによる色/温度変換を適用して温度情報に変換し、ノイズ除去のためにメディアンフィルターをかけ、さらに後に行う 3-D 画像の再構成を容易にするために 11×11 画素で移動平均によるスムージングを行った。その結果の一例 (半断面で図の左端が中心軸) が Fig.7 に示した温度成層と同じ色/温度の対応関係を用いて Fig.9 に疑似カラー表示されている。したがってこの図を含めて以降に示す Fig.10, 11, 13 の色/温度対応関係については Fig.7 のカラーバーを参照されたい。ここでは画像処理によって定量化された温度分布を疑似カラー表示した結果のみについて示すが、これは視覚的に分かりやすいようにするためであって、等温線を描くことも当然可能である。Fig.9 においては移動平均の制約から図の上下端と容器壁に接する右端に 5 画素ずつの移動平均がかからない領域が残されているが、全体的にはうまく平滑化が施されている。中央部 (図の左端付近) を高温の流体が上昇し、上壁で冷却されて容器外周付近で下降する軸対称に近い対流状態であること

Fig.9 Temperature field in vertical cross section (Color-to-temperature relationship is indicated in Fig.7).

Fig.10 Temperature field in horizontal cross section at $Z = 25\text{mm}$ (Color-to-temperature relationship is indicated in Fig.7).

Fig.11 Temperature field in horizontal cross section at $Z = 25\text{mm}$ (Image interpolated by B-spline function. Color-to-temperature relationship is indicated in Fig.7).

Fig.12 Visualized image in horizontal cross section at $Z = 25\text{mm}$.

Fig.13 3-D image of temperature field (Color-to-temperature relationship is indicated in Fig.7).

が推測される。

このような178枚の画像を用いて3-D場の温度分布に再構成した結果の一例がFig.10に示されている。これは容器の上面からの高さ方向座標、 $Z = 25$ mm (中央高さ)、における容器水平断面内の温度分布である。画像収録のタイミングから考えて各測定画像間に容器外周部で7画素程度の温度データが欠落している。そこで次に円周方向に補間することによって欠落している部分のデータを埋める必要がある。この周方向補間にB-スプライン関数を用い、それによってテスト空間内の任意の位置の温度情報が得られた。

画像処理によって得られた $Z = 25$ mmでの最終的な温度分布がFig.11に、そして容器の上面側から $Z = 25$ mm付近の感温液晶の呈色状態をスチルカメラで直接撮影した結果がFig.12に示されている。容器中央に高温部分が、周囲に低温部分があることや、外周部の一部には温度の高い部分があることなど、Fig.11とFig.12は非常によく対応している。最後にFig.13には容器内のいくつかの高さでの断面内温度分布が鳥瞰図的に示されている。容器の中央付近を上昇し、周囲付近で下降する軸対称的な対流が基本であるが、最も底面に近い部分には周方向に6個に分割された外周から中心方向に回転する2次のなロール状の対流が存在し、そのロール構造は容器の中央高さ付近まで達していることも分かる。

このように回転を伴うレイリーベナール対流においては回転レイノルズ数が小さい場合には静止状態と同様にロール状の対流が認められ、ここで示した程度の回転レイノルズ数では軸対称的な対流状態になることはアスペクト比50 mm/20 mmにおける実験においても確認している。このような対流パターンの遷移に関しては従来ほとんど報告がなく、今後さらに実験を行って別途報告する予定である。

5. 結 言

感温液晶懸濁法によって得られた回転容器内の自然対流可視化画像にカラー画像処理を適用することによって、対流場の3次元の温度情報を定量的に求めることができた。ここで述べた手法は、流れ場が定常的である場合の3次元温度分布を把握する上で非常に有効な手段であるが、非定常性が強い現象に対しては今後さらに検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 木村竜治: 液晶による水温分布の可視化について, 第2回流れの可視化シンポジウム, (1974), 99-102.
- 2) 秋野詔夫: 温度と伝熱現象の可視化, 流れの可視化, 7-27 (1987), 418-424.
- 3) Ozawa, M. et al.: Flow and Temperature Measurement of Natural Convection in a Hele-Shaw Cell Using a Thermo-Sensitive Liquid-Crystal Tracer, Experiments in Fluids, 12 (1992), 213-222.
- 4) Ozawa, M. et al.: Natural Convection in a Slender Rectangular Cell with Two-Component Stratified Layers, Heat Transfer 1994, 7 (1994), 137-142.
- 5) 木村一郎, ほか4名: 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, 27-8 (1991), 870-877.
- 6) Takenaka, N. et al.: Three-Dimensional Void Fraction Measurement of Two-Phase Flow in a Rod Bundle by Neutron Radiography, Proc. the 2nd Int. Topical Meeting on Neutron Radiography System Design and Characterization, (1995), 258-262.
- 7) 竹中信幸, ほか3名: 感温トレーサによる温度成層ロールオーバー現象の可視化, 第24回日本伝熱シンポジウム, (1987), 657-659.
- 8) 木村一郎, 打出浩一, 小澤守: 感温液晶を用いた温度場の画像計測 (ニューラルネットワークによる色/温度変換特性の改善), 可視化情報, 12, Suppl. 1 (1992), 7-9.