224 感温液晶温度計測法と注入流脈可視化法を用いた ヒータユニット内の熱拡散と流体混合の比較研究

斎藤竜史[○] (高砂製作所 (株))、藤澤延行、高野剛 (新潟大学工学部)、
横田正二、田名網弘、渡部功 (カルソニック (株))

Comparative Study of Flow Mixing and Thermal Diffusion in a Heater Unit by Using Liquid Crystal Thermometry and Flow Visualization with Dye Injection Technique

Ryushi Saito, Nobuyuki Fujisawa, Tsuyoshi Takano, Masaji Yokota,
Hiroshi Tanaami, Isao Watanabe

ABSTRACT

The flow mixing performance in a heater unit for automobile has been studied by model experiment using the thermo-sensitive liquid crystal technique and the color tracer visualization technique. The former technique combined with the image processing provides a temperature distribution in the unit, while the latter shows the diffusion distribution of the main and heater flow. Both techniques provide useful tools for understanding the flow mixing performance of the main and heater flow in the unit. It is found that the diffusion distributions obtained from the color tracer technique reproduces the qualitative nature of the flow mixing obtained from the temperature distributions by liquid crystals. These visualization studies show that the flow mixing performance inside the heater unit depends strongly on the mixdoor angles. The mixing performance was also evaluated quantitatively by using the temperature distribution obtained from the liquid crystals downstream of the heater unit.

Keywords: Flow visualization, Flow mixing, Heater unit, Liquid crystal, Automobile

1. 緒言

自動車用ヒータユニットは、ミックスドア開度を変化させることで、主流とヒータ流を混合させ、所定の温度の気流を車室内に通風する装置である。これに関する過去の研究としては、流れの可視化による定性的考察や数値シミュレーションによって検討されてきたが、最近、混合領域の可視化⁽¹⁾⁽²⁾やPIV法による内部流の速度計測⁽³⁾も行われ、ユニット内での混合機構についての理解が深まってきた。一方、ヒータユニットの性能は、主にユニット出口における温度分布の一意性が重要な設計要因であるが、それに強く関わるユニット内部での温度分布の測定例は少ない。熱電対による点測定を行った測定結果⁽⁴⁾も報告されているが、プローブ挿入によって流れを乱す可能性もあり、また点測定であるため流れ場全体を測定するにはかなりの測定時間を要するため、流れ場全体を計測するには実用的ではないように思える。これに対し、感温液晶を用いた温度計測法は、作動流体として水を使用するが、非接触で全温度場を瞬時に計測可能であり、ここで目的とするヒータユニットの性能評価に

有効であろう。一方、著者らは、2色カラー染料による混合領域の可視化抽出法⁽²⁾を提案した。すなわち、染料として作動流体中にローダミンBならびにフルオレセインソジウムを希釈混入し、それらの拡散によって生じる色の変化をRGB色空間における画像解析によって抽出する方法である。この手法の有効性を検証するためには、同一条件下で温度分布を計測し、熱拡散による流れの混合結果と比較する必要がある。

本研究では、ヒータユニット内部における温度分布を感温液晶法により計測し、流体混合の評価を行うとともに、2色カラー染料法による混合領域の抽出結果と比較検討することによって有効性を評価することを目的とする。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験は、図1に示すような模型ユニット (実機の15%の寸法) を縦形水槽の測定部に取り付けて行った。ここに、作動流体は水である。供試ユニット内部には、ミッ

クスドアが設置されており、それを軸回りに回転させ開度を変化させることで主流とヒータ流の流量比を調整することができる。その下流側では、両流れを混合し、その下流側流路では一様な温度分布を得るような構造である。供試ユニットのヒータ部は、直径2mmのヒータ10本から成っており、交流電源を用いて通電して加熱する構造である。

図2は、供試ユニットとその温度場ならびに流体混合の可視化に用いた画像計測システムである。温度場の可視化には、マイクロカプセル化された感温液晶トレーサ粒子を用い、流体混合の可視化にはローダミンBならびにフルオレセインソジウム希釈溶液による2色カラー染料可視化法⁽²⁾を適用した。いずれの可視化実験においても、光源としては、ストロボスコープからの白色光をシリンドリカルレンズでシート状(厚さ5mm)にして用い、それをユニット中央断面に照射した。一方、これらの可視化画像の取得には、3板式カラーCCDカメラ(768×494画素、RGB8ビット)を用い、その出力は一旦ビデオレコーダーに録画した後、カラーフレームグラバ(512×512画素、RGB8ビット)でデジタル変換した。

2. 2 感温液晶による温度場計測

温度場の可視化には、マイクロカプセル化された感温液晶トレーサ粒子(直径10 μ m程度)を作動流体中に体積濃度で0.004%加えて行った。ただし、呈色温度範囲は28~30 $^{\circ}$ Cの2 $^{\circ}$ Cである。感温液晶法による温度場計測を高精度で行うには、検定方法が重要な役割を果たすため、ここでは、目視角度の影響を考慮したスプライン検定⁽⁵⁾を用いた。温度検定実験は、加熱用ヒータにより、作動流体を一定温度(30 $^{\circ}$ 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可視化画像内の色と温度の関係を測定した。なお、検定温度の測定は、ユニット上流側に挿入した熱電対で行ったが、その測定精度は、 $\pm 0.05^{\circ}$ Cである。カラーCCDカメラで撮影された可視化画像は、目視角度の影響ならびにユニット角部やミックスドアの存在によって非一様な入射光の輝度分布のため、検定画像を82×75に分割検定し、それらに対しスプライン検定を行った。その際、分割小領域の色パラメータはRGBからHSIに変換して検定を行った。すなわち、検定画像の示す色パラメータHSIと測定温度Tmの各関係に対し、 $H=f(T_m)$ 、 $S=g(T_m)$ 、 $I=h(T_m)$ なる関係をスプライン関数(区分的3次多項式)で近似し、あるHSIのデータの組み合わせが与えられると、これらと上記の検定関係との距離を最小にする温度を試行錯誤的に決定する方法である。

2. 3 2色カラー染料による混合領域の可視化

主流とヒータ流の混合領域を識別するためローダミンBとフルオレセインソジウムによる2色カラー染料可視化法を適用した。いずれの溶液もエチルアルコールを加え比重を作動流体である水と一致させたのち、約200倍に希釈して用いた。これらの染料は、主流側、ヒータ

コア内部にいずれも4本のノズルを取り付け、それらから注入することでユニット内部に供給した。各ノズルは内径0.7mmのステンレス管である。ただし、ヒータ流側からローダミンBを主流側からフルオレセインソジウム溶液を注入した。先に報告したRGB画像における色抽出法⁽²⁾は、RGBいずれも染料の注入量の違いによる輝度変化の影響を受けるため、得られた混合領域が注入量の影響を受ける。ここでは、この問題を解消するため、輝度とは独立であるH画像に基く解析を行った。一方、混合領域の識別においては、閾値の選択の影響を受ける。可視化によって得られたH画像のヒストグラムの一例を図3に示す。図によると、ローダミンBの示すオレンジ色とフルオレセインソジウムの示す緑色が、それぞれH値として、0ならびに70付近に現れるが、かなり広い範囲に渡って流体混合によってそれらの中間の色が生じている。ここでは、混合領域の定義として、ローダミンBとフルオレセインソジウムの示すH値から急減に変化するH値たとえば、7と51を求め、その間を0—255で再定義し、さらにそれをカラーバーで5等分割して示した。

3. 結果および考察

3. 1 温度場計測結果

図4は、感温液晶法による可視化結果に対し、スプライン分割検定を適用し、ヒータユニット内部の温度分布を可視化計測した結果である。ただし、ミックスドア開度が $\theta = 1/4$ (a), $2/4$ (b), $3/4$ (c)における測定結果を示した。図から明らかなように、ミックスドア開度の小さい $\theta = 1/4$ の場合にはヒータコアで加熱された流体が下流側のかかなり広い領域に広がりを示し、主流とヒータ流が混合室であまり混合していないことが分かる。また、同様に非一様な温度分布は下流側流路においても認められ、ヒータ側から発生した高温流は、下流側流路の角部に生じるはく離循環流の効果で下壁側から上壁側へ移動するが、温度分布を一様化するには至っていないことがわかる。ミックスドア開度が $\theta = 2/4$ に増大すると、ヒータコア下流側に形成される高温域はヒータコア側に縮小効果を示し、また、下流側流路における温度分布の非一様性は減少する。このようなミックスドア開度の増加に伴う主流とヒータ流の混合効果の増大は、さらにミックスドア開度を増大させた $\theta = 3/4$ の測定結果において特に顕著に認められ、主流がヒータ流側にかかなり強く入り込み、両流れに強い混合効果が現れることがわかる。このため、 $\theta = 3/4$ における下流側温度分布は、ユニット混合室の近くにおいても良好な一様性が得られており、主流とヒータ流の強い混合の結果を示唆する。

図5は、下流側流路における温度分布が下流方向3断面($x = 38, 67, 98$ mm)で変化する関係を種々のミックスドア開度について示した結果である。(断面位置は図1参照)ただし、座標x、yは、図1に示したようにユニット下側の角部を原点とした距離である。い

れの断面位置における結果においても、ミックスドア開度の小さい場合 ($\theta = 1/4$) には下流側流路の断面方向にかなり強い温度勾配が認められるが、ミックスドア開度の増加に伴い、急激に温度分布の一樣化が生じていることが明らかである。また、このような温度分布の一樣性は、断面1、2の結果から明らかなように、混合室直後の断面付近ではヒータ流の影響を直接受けるため下流方向に急激に改善されるが、断面2、3の結果によると、あまり改善が見られないことがわかる。これは、下流側流路を長くしても温度分布の一樣性を改善する効果はあまり期待できないことを示唆する。

3. 2 混合領域の可視化

図6は、2色カラー染料を用いた可視化結果のヒューH情報に基きヒータユニットにおける混合領域を識別した結果である。ただし、いずれの染料も存在しないユニット上流側の領域は主流として判断して示した。感温液晶法による温度場計測結果(図4)と同様に、ミックスドア開度の増大とともにヒータ流の拡散範囲がヒータ流側に縮小され主流がヒータ流側に入り込む様子が認められ、図4との定性的一致を示唆する。しかしながら、下流側流路の上壁付近のはく離領域にヒータ流の影響が見られるように本結果と温度分布の計測結果との相違が認められ、この結果から流体混合を定量的に評価することは困難であるように思える。これは、温度の拡散と流体の拡散が完全には対応しないためと思われる。このように、2色カラー染料による混合領域の可視化法は、熱拡散の定性的評価においてのみ有効な手段を提供すると考えられる。

4. 結論

自動車用ヒータユニットにおける流体混合を可視化するため、感温液晶法による温度場計測と2色カラー染料による混合領域の可視化を行った。実験結果によると、いずれの方法もミックスドア開度による流体混合の違いを定性的に評価可能であるが、下流側流路で両結果の相違が見られ、熱拡散の定量的評価には温度計測する必要があることを示した。

終わりに、本研究を進めるに当たり協力された、新潟大学学生、池田宙史君、丹野格君へ謝意を表する。

参考文献

- (1) Fujisawa, N., Proc. 7th Int. Symp. Visualization (1995), Seattle, pp.384-389.
- (2) 藤澤ほか4名、機論(B), 62-593(1996), pp.153-157.
- (3) Fujisawa, N. et al., Proc. 8th Int. Symp. Flow Visualization(1998), Sorrento, pp.222.1-222.8.
- (4) Fujisawa, N. et al., Proc. 5th Asian Symp. Visualization(1999), Bari, pp.128-133.
- (5) 船谷ほか3名、可視化情報(1999), 19 Suppl. 1.

Fig.1 Experimental model of heater unit

Fig.2 Experimental apparatus for flow visualization and image processing

Fig.3 Histogram of H image visualized by two color injection technique

Fig.4 Temperature distributions in heater unit measured by liquid crystal thermometry
(a) $\theta = 1/4$, (b) $\theta = 2/4$, (c) $\theta = 3/4$

Fig.5 Cross-sectional distributions of temperature in heater unit

Fig.6 Diffusion distributions of main and heater flow by two color injection technique
(a) $\theta = 1/4$, (b) $\theta = 2/4$, (c) $\theta = 3/4$