

## 自動車用ヒータユニットにおける気流速度の 画像計測と数値計算\*

藤沢 延行<sup>\*1</sup>, 井上 智<sup>\*2</sup>, 横田 正二<sup>\*3</sup>  
田名網 弘<sup>\*3</sup>, 渡部 功<sup>\*3</sup>, 高野 祐二<sup>\*4</sup>

### Air Flow Measurement by Image Analysis and Numerical Calculation of Flow Fields in a Heater Unit for Automobiles

Nobuyuki FUJISAWA, Satoshi INOUE, Masaji YOKOTA,  
Hiroshi TANA-AMI, Isao WATANABE and Yuji TAKANO

Air flows in a heater unit for automobiles are studied by flow visualization with tracer injection technique and the visualized images are analyzed by cross correlation method to obtain the velocity distributions in the unit at various mixdoor angles. The results indicate the variations of flow pattern in the heater unit with the mixdoor angles and the appearance of strong interaction between separated main flow and circulating heater flow at relatively large mixdoor angles, which promotes the flow mixing and simultaneously increases the pressure loss inside the unit. The flow fields in the heater unit are calculated numerically based on three-dimensional momentum equations combined with  $k-\epsilon$  model of turbulence and with an experimental flow model of heater core. The numerical results reproduce well the experimental flow patterns in the heater unit, but there exists some deviations in the mean velocity and surface pressure distributions at large mixdoor angles.

**Key Words:** Flow Measurements, Digital Image Processing, Flow Visualization, Numerical Analysis, Air Conditioning Unit, Automobile

### 1. 緒 言

自動車用空調装置は、プロワユニット、クーリングユニット、ヒータユニットなどからなっており、車室外から取り入れた気流を希望する温度に加熱冷却して車室内に通風する装置である。このうち、ヒータユニットは、気流の一部をヒータコアで加熱し、さらにミックスドア開度の調整によって取り入れた気流とユニット混合室で混合させる役目を持つ。したがって、この装置の設計開発においては、ユニット出口における気流の温度分布が均一になるように、車室外からの主流とヒータコアを通過するヒータ流をユニット内部で混合させることが重要である。また、実用的には、ユニット形状の小型化が要求されており、より小さい空間で主流とヒータ流を効率良く混合させる必要がある。このことから、ヒータユニット内部の流れと混合機構が最近しばしば研究課題として取り上げられてきた。すなわち、実験的には、スモーキュア法<sup>(1)</sup>、煙注入法による流れの可視化観察<sup>(2)</sup>を始めとし、レー

ザスペックル法<sup>(3)</sup>、PIV法<sup>(4)</sup>による速度分布の測定、LIF法と画像解析を併用した混合領域の計測<sup>(4), (5)</sup>などが行われ、ミックスドア開度の違いによる速度場と混合領域の変化が模型ユニットにおいて検討された。一方、ユニット内部の速度場を  $k-\epsilon$  モデルや直接数値計算によって 2 次元<sup>(1)</sup>あるいは 3 次元解析<sup>(3), (6)</sup>が行われている。ただし、これらの計算においては、ヒータコア内部流までも数値計算することは困難かつ経済的でないため、そこでの流れや圧力損失を実験データに基づいてモデル化する必要がある。したがって、計算と実験の一致性は、流れの基礎方程式や計算スキームだけでなく、ヒータコアの圧力損失モデル<sup>(6)</sup>の精度にも依存する。このため、ヒータユニット内流れの数値計算法の一般的評価は困難であり、過去の研究<sup>(1), (3)</sup>では流れの可視化観察との定性的比較に止まっている。また、実機の作動条件下における速度分布やユニット表面圧力分布などの基本的物理量の測定が十分に行われていないことも計算の評価がなされていない理由として挙げられる。

本研究では、実機ヒータユニット内の気流速度分布の可視化と画像計測ならびにユニット表面圧力分布の測定を行い、同一条件下の3次元流れ計算結果と比較検討することによって、実機ユニット内の流れ現象

\* 原稿受付 1998年2月26日。

\*<sup>1</sup> 正員、新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。

\*<sup>2</sup> 学生員、群馬大学学部生(〒376-8515 桐生市天神町1-5-1)。

\*<sup>3</sup> 正員、カルソニック(株)テクニカルセンター(〒327-0816 佐野市栄町7-3)。

\*<sup>4</sup> カルソニック(株)テクニカルセンター。  
E-mail: fujisawa@eng.niigata-u.ac.jp

の解明とユニット内流れの計算法の有効性について評価することを目的とする。

## 2. 実験装置および方法

図1に本実験に用いた模型ユニットの概略を示す。これは、実機ユニットと同程度の入口寸法(断面寸法200mm×200mm)を有しており、また代表的作動モードであるフェイスモードを考慮して設計したユニット形状である。供試ユニットには、ヒータコアとミックスドアが配置されており、ミックスドアをその軸回りに回転させ、主流とヒータ流の流量比を調整することによって、その下流側の混合室で両流れを混合させる仕組みになっている。通常、ヒータコアは加熱状態で使用されるが、ヒータユニットの作動条件下では浮力の影響は十分に小さく、また本実験は速度場と圧力場を計算と比較する目的であるので、加熱なしの条件で実験した。なお、可視化観察のためヒータコアを除く供試ユニットはすべて透明なアクリル樹脂製である。

図2は、本実験に用いた可視化実験装置の概略である。すなわち、供試ユニットを小型吹出し風洞の収縮

ノズル吹出し口下流側に設置して実験を行った。流れの可視化は、気流に対し良好な追従性を示すマイクロバルーン(粒径30~50 μm、密度42kg/m<sup>3</sup>)を用い、それを風洞の収縮ノズルの上流側から内径4mmのノズルを通して注入する方法で行った。照明としては、ユニット周囲に設置した2台のストロボスコープから発する厚さ5mmのスリット光を用い、それはユニットの中央断面に沿って照射した。ユニット下流側には、粒子吐き出し用のダクトが取り付けてあり、実験室外部に吐き出されるようにしてある。また、そのダクトの途中にはベンチュリ管があり、風量の測定がなされる。可視化実験は、ヒータユニット入口断面における平均風速が0.5m/secの条件で行い、ユニット表面の圧力分布測定は圧力変換器の測定精度の点から平均風速1.5m/secの条件下で行ったが、いずれも実機における作動条件の範囲である。ただし、圧力測定は、同一寸法の別ユニットを用い、中央断面の壁面上に設けた計73個の静圧孔において歪みゲージ式圧力変換器で壁面静圧を検出し、A/D変換器を通してコンピュータ処理して測定した。

流れ場の可視化と画像計測は、図3の計測システムで行った。すなわち、可視化された流れ場の撮影にはモノクロCCDカメラを用い、それが出力する垂直同期信号の前後のタイミングで2台のストロボが発光するようにコンピュータ制御した<sup>(7)</sup>。ただし、同一断面位置での可視化観察を行うため、2台のストロボは光ファイバーを介してシリドリカルレンズの付いた光学系に接続されている。このとき、トレーサであるマイクロバルーン群の微小時間間隔における可視化画像はVTR上に連続した奇数と偶数フィールドの画像として書き込まれることになる。なお、本実験では、このような2発のストロボの発光時間間隔は3msecに設定した。また、本ストロボの発光時間は約20 μ secであり、移動する粒子を撮影するのに十分短い。このようにして撮影された画像は、フレームグラバ(512

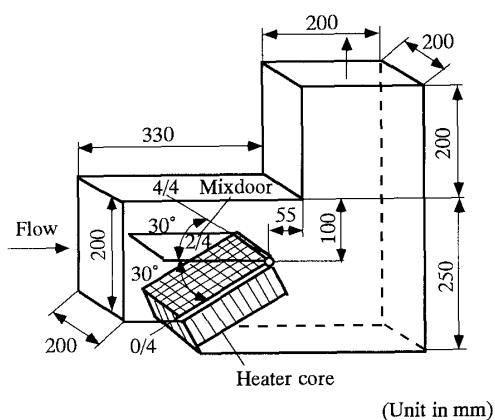


Fig.1 Geometry of heater unit

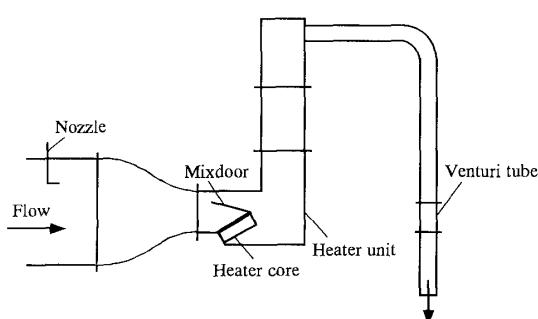


Fig.2 Experimental apparatus for flow visualization

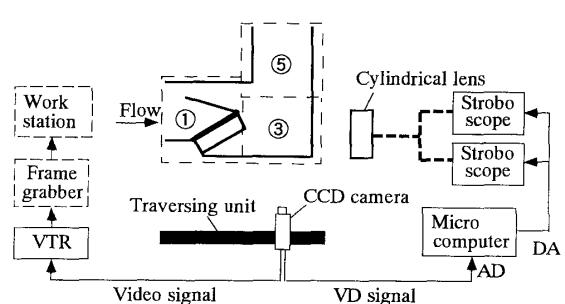


Fig.3 Image processing system

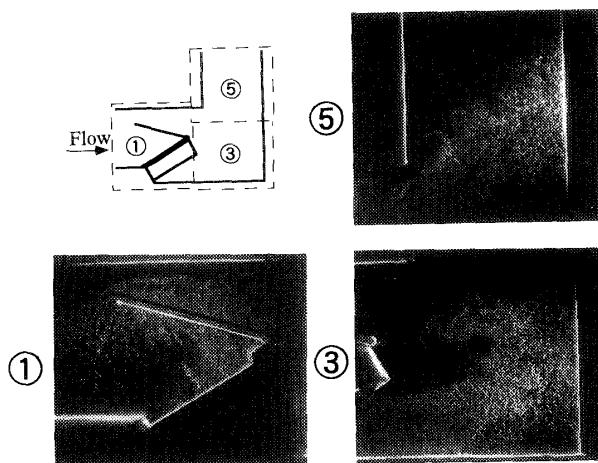


Fig.4 Typical example of flow visualization by tracer injection method

$\times 480$  ピクセルの空間分解能で 256 階調) を使ってディジタル変換し、奇数と偶数フィールド各々の画像の空隙処理をして 2 枚の  $512 \times 480$  ピクセルの画像を得た。ただし、本実験では、速度の測定精度を向上させるため、測定対象であるヒータユニットを  $250\text{mm} \times 234\text{mm}$  の測定空間 5箇所に分け、各々を CCD カメラで分割撮影した。なお、CCD カメラの移動は 2 次元トラバース装置に固定して行った。速度解析は、微小時間間隔の連続した 2 画像に逐次棄却法に基づく濃度相関法<sup>(8)</sup> を適用して行った。ここに、相関マトリックスの大きさは、エラーベクトル数が最少となる条件から  $15 \times 15$  とし、それによっても残ったエラーベクトルはホップフィールドモデルを用いたニューラルネットワーク法<sup>(9)</sup> によって取り除いた。さらに、同一測定位置における速度ベクトルの測定結果を 20 枚重ね合わせて時間平均化処理を施した。図 4 は、図 3 に示したヒータユニットの各部(番号①、③、⑤)における流れの可視化観察結果の一例である。なお、本実験のノズルからマイクロバルーンを注入する可視化法では、1 回のトレーサ注入で全流れ場を一度に観察することは困難であるため、可視化する部分に応じてノズル位置を調整する必要がある。

### 3. 数値計算

数値計算の基礎方程式としては、3 次元非圧縮性乱流に対する運動方程式、連続の式ならびに  $k-\varepsilon$  モデルの基礎方程式を用いた。ここでは、汎用熱流体解析ソフト(STAR-CD)を用いて数値計算を行った。すなわち、直交一般座標系に展開したこれらの基礎方程式をレギュラー格子を用いた有限体積法で離散化し、差分近似には風上法、計算アルゴリズムとして SIMPLE 法を用いた。計算格子点数は計 292360 点である。図 5 には、数値計算に使用した計算格子の横断面図を示す。すなわち、速度変化の大きい物体近傍に格子を集中させ他では格子を粗くして、全体のバランスを考えて配分した。ただし、奥行方向には等間隔格子を採用した。また、図 5 からも分かるように、境界条件位置はミックスドアの影響を受けない位置として、上流側はユニット上流  $200\text{mm}$  の位置に、下流側はユニット下流  $500\text{mm}$  の位置にとり、入口側では一様な流入条件を、出口側では計算する物理量の流れ方向勾配を零とする流出条件を与える。一方、壁面境界条件としては、壁関数を用いて与える。なお、入口の速度境界条件は、本実験に合わせて設定した。すなわち、本実験の速度計測との比較には  $U=0.5\text{m/sec}$ 、圧力計測に対しては  $U=1.5\text{m/sec}$  である。

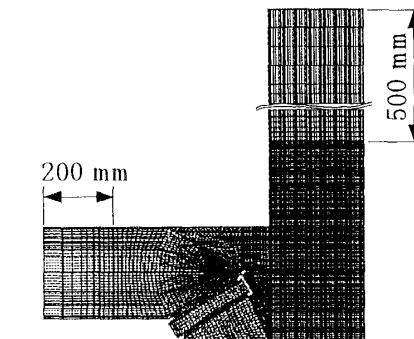


Fig.5 Numerical grids for heater unit

ムとして SIMPLE 法を用いた。計算格子点数は計 292360 点である。図 5 には、数値計算に使用した計算格子の横断面図を示す。すなわち、速度変化の大きい物体近傍に格子を集中させ他では格子を粗くして、全体のバランスを考えて配分した。ただし、奥行方向には等間隔格子を採用した。また、図 5 からも分かるように、境界条件位置はミックスドアの影響を受けない位置として、上流側はユニット上流  $200\text{mm}$  の位置に、下流側はユニット下流  $500\text{mm}$  の位置にとり、入口側では一様な流入条件を、出口側では計算する物理量の流れ方向勾配を零とする流出条件を与える。一方、壁面境界条件としては、壁関数を用いて与える。なお、入口の速度境界条件は、本実験に合わせて設定した。すなわち、本実験の速度計測との比較には  $U=0.5\text{m/sec}$ 、圧力計測に対しては  $U=1.5\text{m/sec}$  である。

ヒータコア部は多数の蜂の巣状構造からなっており、それを流れ計算に直接組み込むことは極めて困難であるため、そこでの流れ条件や圧力損失については別途扱う必要がある。すなわち、ヒータコアにおける流れの整流作用を考慮して、流入および流出ベクトルをコア面に対して垂直と仮定する。このとき、ヒータコアでの圧力損失は、一様流におけるヒータコア単体での実験結果に基づく圧力損失の実験式を用い、流れ計算から得られるコア面に垂直方向速度に損失係数の実験値を乗ずることで見積もった<sup>(6)</sup>。

### 4. 結果および考察

図 6 (a), (b), (c) は、それぞれ、本実験における速度ベクトルの測定結果、 $k-\varepsilon$  モデルによる速度場の数値解析結果、および、ユニット表面の圧力分布の測定と計算の比較結果である。ただし、図 6 (a), (b) の速度ベクトル図については、ユニット入口の断面平均流速  $U=0.5\text{m/s}$ 、レイノルズ数は  $Re (=UD/U)$

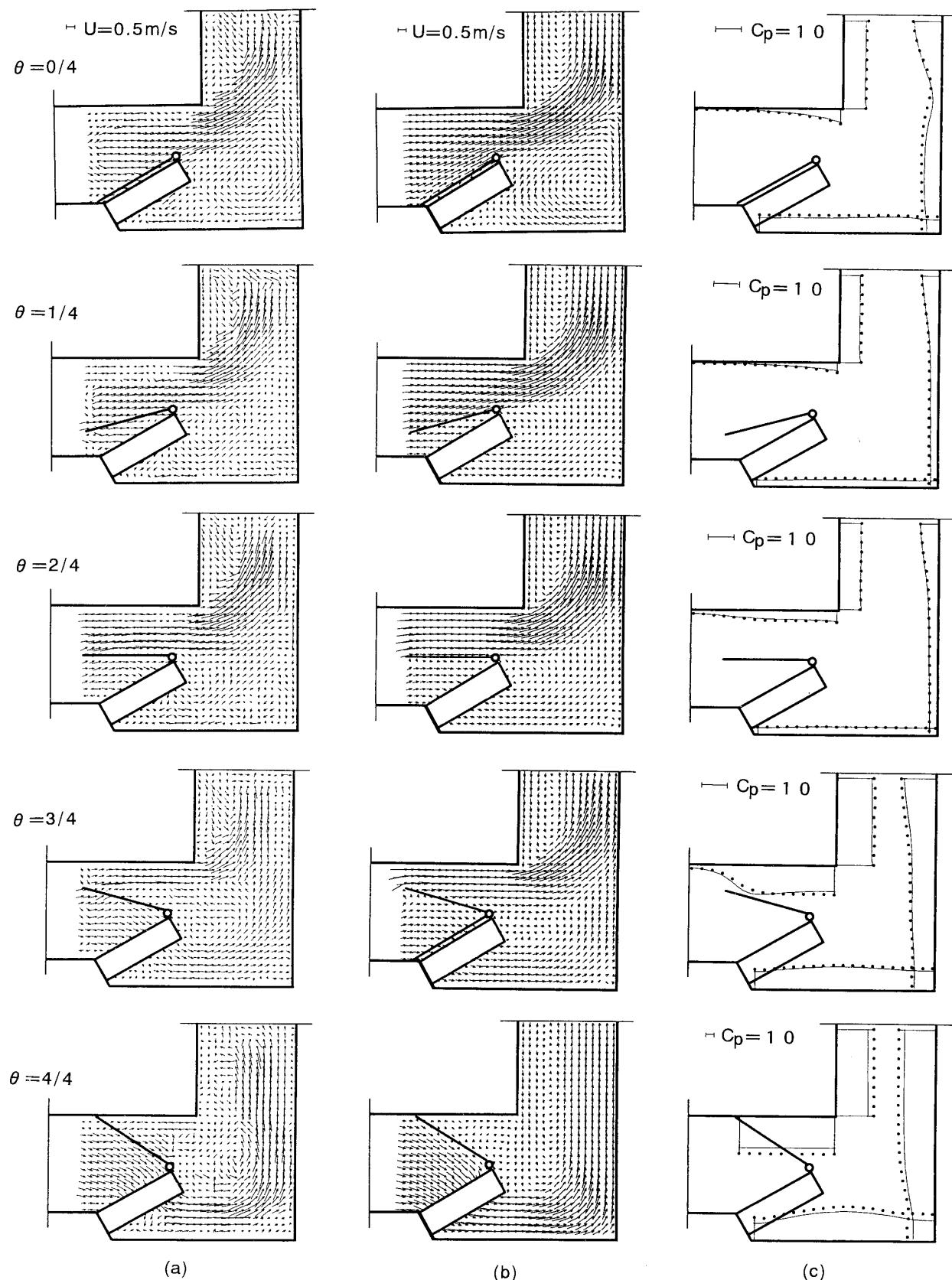


Fig.6 Experimental and numerical results of velocity and pressure distributions in heater unit  
 (a) Velocity distributions (Experiment), (b) Velocity distributions (Calculation),  
 (c) Surface pressure distributions(● Experiment, — Calculation)

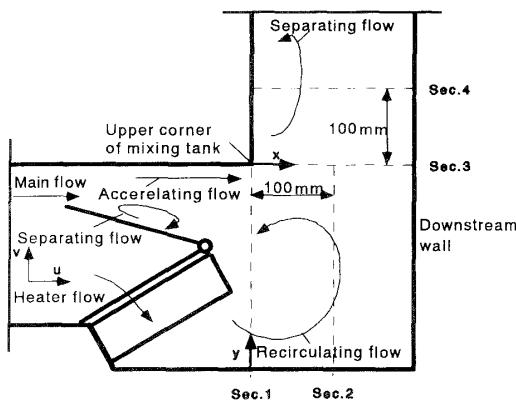
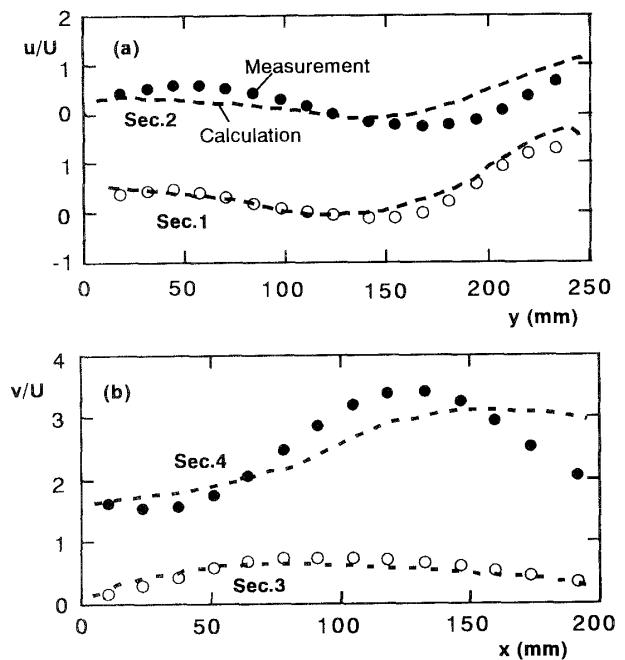


Fig.7 Schematic illustration of flow patterns

$\nu = 6700$  の条件であり、図 6 (c) の圧力分布図では  $U=1.5\text{m/s}$ 、レイノルズ数は  $Re=20000$  である ( $D$ : ユニット入口寸法、 $\nu$ : 流体の動粘度)。いずれの場合においても、5種のミックスドア開度  $\theta = 0/4, 1/4, 2/4, 3/4, 4/4$  における結果が示されている。なお、以下に示す流動状況の説明のため、ヒータユニット内の流れパターンの模式図 ( $\theta = 3/4$ ) と流れの名称を図 7 に示した。図 6 (a) の速度ベクトルの測定結果によると、ミックスドア開度の小さい  $\theta = 0/4$  では、ドアは全閉状態にあるため、主流はドアに沿って加速され混合室上部を通ってユニット出口に向う。このとき、ヒータコア下流側の混合室には時計回りの循環流領域が形成され、また混合室上部角部より出口側には流れのはく離領域の形成が見られる。ミックスドア開度が  $\theta = 1/4$  に増大すると、ヒータコアを通る流れが生ずるため混合室に見られた時計回りの循環流は消滅し、逆に弱い反時計回りの循環流がヒータコア下流側に形成される。また、ドア開度の増大に伴い混合室内における主流の增速効果は弱まり、混合室上部角部の下流に発生する流れのはく離領域は縮小する傾向にある。同様な流れパターンの変化は  $\theta = 2/4$  においても観測されており、 $\theta = 1/4$  と  $\theta = 2/4$  の流れ場の類似性が認められる。一方、ミックスドア開度が  $\theta = 3/4$  に増大すると、ヒータ流の增速効果によって混合室に反時計回りの循環流が形成され、その一部はヒータコア側へ回り込むが、大部分は下流側壁面に沿って出口側へと進む。一方、ドア開度の増大に伴い主流にはかなり強い增速効果が予期されるが、本実験ではエラーベクトルが多く、十分な精度の速度測定が困難であった。これは、本実験ではこの狭い領域に十分な量のトレーサ粒子を送り込むことが困難であったこと、ならびに同一画像内に速度のかなり異なる流れが存在する場合には、本実験の濃度相関法による速度解析に限界があることを示唆する。ただし、多少增速効

Fig.8 Velocity distributions at sections 1 to 4  
(a) Sections 1 and 2, (b) Sections 3 and 4

果が弱まり同時に流れに拡散効果が見られる混合室上部付近には主流の增速流が認められ、ヒータ流とともに出口側へと流出する。一方、ドア上側には主流のはく離領域が形成されていることが観測される。この領域は混合室内にも広がりを見せており、そこではヒータ流の形成する循環流と合流し、主流とヒータ流の強い混合が予期される。このような、本実験から得られた  $\theta = 3/4$  附近における主流とヒータ流の強い混合作用は、ヒータコア加熱状態の同一ユニットで測定された温度分布の拡散作用<sup>(4)</sup> と良く対応する。さらにミックスドア開度が増大した  $\theta = 4/4$  では、ヒータ流だけが存在するため、混合室にはヒータ流による反時計回りの循環流が混合室全域に形成され、その一部は循環を続けるが、大部分は下流側壁面に沿って出口側へ流出する。

図 6 (b) は、図 6 (a) と同一条件下におけるヒータユニット内部の 3 次元流れ解析結果である。主流の增速効果、混合室における循環流、混合室上部角部やミックスドア上側におけるはく離域の形成など実験で観測された主な流れ現象が定性的には良好に数値計算結果に再現されており、数値計算の有効性を示す。しかしながら、詳細には、ミックスドア開度の大きい  $\theta = 3/4, 4/4$  では混合室における循環流や下流側ダクト部の速度ベクトルに見られるように、主流とヒータ流の混合領域やヒータ流の巻き込み効果に多少の相違が見られる。なお、定量的比較のため、ヒータユ

ニットの断面 1—4 (図 7) における速度分布の実験と計算結果を図 8 (a), (b) に示した。これらの結果によると、主流の增速効果、ヒータ流の混合室での広がり (図 8 (a)) ならびに混合室上部角部におけるはく離域の形成と下流側ダクトにおける速度分布の偏り (図 8 (b)) が実験および計算において認められ、両結果の定性的一致が見られる。しかしながら、計算結果は、增速効果をやや大きく、ヒータ流速をやや小さく評価しており、また、下流側ダクトにおける速度分布で最大速度の位置が壁寄りとなる傾向が計算に見られ、詳細には実験との定量的一致までは得られていないことがわかる。

図 6 (c) は、供試ヒータユニットの中央断面において測定した表面圧力分布を圧力係数  $C_p (= (p-p_0) / 0.5 \rho U^2)$  で示したが、その結果は同時に 3 次元流れ解析から得られる圧力分布と比較してある。ただし、 $p_0$  はヒータコアの上流 100mm における圧力値であり、それはミックスドアによる影響をほとんど受けないことを確認してある。また、 $\rho$  は流体の密度である。ユニット表面の圧力分布は、全体的にはミックスドア開度の小さい  $\theta = 0/4 \sim 1/4$  では  $\theta$  の増大とともに負圧が弱まり圧力損失の低下を招くが、さらに  $\theta$  が大きくなると負圧は増加に転じ、ユニット内部の圧力損失は増大する。一方、混合室下流側の圧力分布を見ると、 $\theta = 0/4$  では主流の衝突による岐点効果が見られるが、それはミックスドア開度の増大とともに弱められ、主流がヒータ流によって出口側へ押し曲げられる効果が強まるなどを示唆する。実験と計算の一致性は、いずれのミックスドア開度においても、速度場と同様定性的には良好であるが、ミックスドア開度の大きい  $\theta = 3/4, 4/4$  において実験と計算の相違が徐々に増大する傾向にある。圧力分布の定量的一致は、 $\theta = 0/4 \sim 3/4$  では 10 % 以下であるが、 $\theta = 4/4$  では 20 % 程度まで増大する。このようにミックスドア開度の増大とともに実験と計算の一貫性が低下する傾向は、速度ベクトル図の場合と同様の傾向である。この原因は、数値計算に使用した  $k-\epsilon$  モデルが急激な曲がりを伴う流れにおいて不一致を示すこと<sup>(10)</sup> や数値拡散の影響も考えられるが、ヒータコア部における圧力損失モデルに含まれる実験値の影響も大きいと推定される。

## 5. 結 言

自動車用空調装置のヒータユニット内部の気流をトレーサ法により可視化し、それを画像解析することにより、種々のミックスドア開度における速度場を計測し、また、 $k-\epsilon$  モデルに基づく 3 次元流れ解析結果と比較検討し、以下の結論を得た。

- (1) 粒子注入法による気流の可視化と濃度相関法に基づく速度場解析法を実機ヒータユニット内部気流に適用し、種々のミックスドア開度における速度場を実測した。併せてユニット表面の圧力分布を明らかにした。
- (2) ヒータユニット内部の流動現象は、混合室におけるヒータ流の循環効果、主流の增速効果、ミックスドア下流側のはく離流の形成とヒータ循環流との干渉効果などから成っており、ミックスドア開度が増大すると、主流とヒータ循環流に強い混合が現れ、同時にユニット内部の圧力損失の増大を引き起こす。このことは、同ユニットにおけるユニット内温度分布の測定結果と良く対応する。
- (3)  $k-\epsilon$  モデルに基づく 3 次元流れ解析結果は、このような速度場と圧力場の計測結果と定性的には良く一致するが、ミックスドア開度が増大するにつれて、主流とヒータ流が混合する領域の速度分布と圧力損失において差が増大する。

## 文 献

- (1) Ikuta,S. et al., SAE Tech. paper 890574 (1989).
- (2) 藤沢延行・ほか 4 名, 機械学会茨城講演会論文集, (1994-9), 50.
- (3) Yamamoto, K. et al., 可視化情報, 16 (1996-4), 112.
- (4) 藤沢延行・ほか 4 名, 機論 (B), 62-593 (1996-1), 153.
- (5) Fujisawa,N. et al., Proc. 7th Int. Symp. Flow Visualization, Seattle (1995-9), 384.
- (6) 佐々木美弘・ほか 3 名, カルソニックワールド, 1 (1994-8), 57.
- (7) Huang,H.T. and Fiedler,H.E., Exp. Fluids 17 (1994), 356.
- (8) 加賀昭和・ほか 2 名, 可視化情報, 14 (1994-4), 108.
- (9) Kimura et al., J. Flow Visualization and Image Processing, 1 (1994), 261.
- (10) Rodi,W., AIAA J., 20 (1982), 872.