

Velocity-Profile Improvement by a New Catalytic-Converter Flow Deflector

Katsuya HIRATA*, Shinya TANAKA*, Hirochika TANIGAWA** and Jiro FUNAKI*

(Received July 10, 2008)

In the automotive exhaust system, a catalytic converter is one dominant component to produce pressure drop, which induces fuel-efficiency reduction. In addition, non-uniformity of flow through a catalytic substrate causes non-uniform thermal distribution on the substrate, which causes low conversion efficiency. The authors have previously proposed a new method both to reduce the pressure loss and to improve the flow maldistribution, simultaneously. In the present study, velocity profiles are quantitatively observed using the PIV technique together with Pitot-tube measurements, to reveal its improvement mechanism.

Key Words : Exhaust system, Catalytic converter, Diffuser, Pressure loss, Velocity profile

キーワード : 排気システム, 触媒コンバータ, ディフューザ, 圧力損失, 速度分布

触媒コンバータ用新型気流デフレクタによる速度分布の改善

平田 勝哉*, 田中 慎也*, 谷川 博哉**, 舟木 治郎*

1. はじめに

現在の自動車排気ガス規制の傾向から、ほとんどのガソリン車に燃料噴射装置や O₂ センサなどを含む三元触媒コンバータシステムが搭載されている。しかし、このような状況下では、自動車排気系の圧力損失は大きくなりがちである。この圧力損失の主原因の一つは、触媒コンバータ本体にある。圧力損失の増加は、エンジンの出力低下と燃費の悪化を引き起こすため、触媒コンバータの圧力損失低減が望まれる¹⁾。

触媒コンバータの圧力損失を低減する為、ディフューザ形状の影響に着目した研究としては、Wendlandら^{2,3)}、著者ら^{1,4)}がある。Wendlandら³⁾は、圧力損失を低減する方法として Enhanced Diffusion Header (EDH)を提案し、著者ら^{1,4)}は、様々な気流デフレクタを提案した。

一方、総合的観点からは、圧力損失の低減だけでなく、触媒性能の高効率化も重要である。すなわち、担体部の温度分布の均一化が望まれる。温度ムラは速度分布に密

接に関係しており、それゆえ、速度分布の均一化が望まれる。

速度分布を均一にする為の研究としては、Lemme と Givens⁵⁾、Howitt と Sekella⁶⁾、Wendlandら⁷⁾、Maus と Bruck⁸⁾、Caiserら⁹⁾が挙げられる。

一般的に、長さが制限されたディフューザでは、圧力損失と速度の均一性は、相容れない関係にある。もし、空間的制限がなければ、徐々に広がる長いディフューザを用いることが、最も単純かつ有効な手段である。しかし、一般的に、長いディフューザは、空間的にもコスト的にも不利である。ところが、著者らの提案した気流デフレクタは、空間的制限下における圧力損失低減と速度均一化を同時に実現することが期待できる^{1,4)}。

そこで本研究では、圧力損失低減に成功した数種類の気流デフレクタについて、ピトー管と粒子画像流速計 (PIV)を用いて速度分布計測を実施し、気流デフレクタによる速度分布均一化効果について、詳細に論じる。

*Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6461, FAX: +774-65-6830, E-mail: khirata@mail.doshisha.ac.jp

**Department of Mechanical Engineering, Maizuru National College of Technology, Maizuru

記号説明

A	断面積	[m ²]
dA/dx	断面積増加率(流れ方向)	[m]
$dA^*/dx^* = 4/(\pi\Phi_o) \cdot dA/dx$	無次元断面積増加率	
L	長さ(流れ方向)	[m]
$\angle P$	圧力損失	[Pa]
Q	流量	[m ³ /s]
$R (= \Phi_{sub}/2)$	担体半径	[m]
r	半径方向座標	[m]
t	時間	[s]
$V (= Q/A)$	平均流速	[m/s]
v	流速	[m/s]
x	流れ方向座標	[m]
γ	速度分布一様性指数	
Φ	直径	[m]
$\Phi_o (= \Phi_{in} = \Phi_{out})$	原点での直径	[m]
ν	動粘度	[m ² /s]
ρ	密度	[kg/m ³]
θ	片側広がり角	[deg]
φ	方位角座標	[deg]
ω_φ	渦度の方位角成分	[1/s]
	上付き文字	
*	無次元	
	(代表長さ $\Phi_o (= \Phi_{in})$, 代表速度 ($V_o = V_{in}$), 代表密度 ρ)	
	下付き文字	
co	コーン	
co-end	コーン下流端	
di	ディフューザ	
di-end	ディフューザ下流端	
do	ドーム	
do-end	ドーム下流端	
EDH	EDH	
e	有効	
h	気流デフレクタ中心穴	
in	インレットパイプ	
o	原点(ディフューザ上流端)	
out	アウトレットパイプ	
sub	担体	

2. 実験方法

2.1. 気流デフレクタ

空間的制限下で圧力損失低減と速度一様化の同時実現の為、著者らは、ディフューザ部に中心穴のある中実構造のドーム形状気流デフレクタ(以下、中実ドーム)を挿入することを提案し、圧力損失低減に成功した⁴⁾。図1にドームを装着した触媒コンバータの概略を示す。

ディフューザ部と縮小部は正円錐台形状であり、触媒は円形断面を有するセラミックモノリス担体である。また、セルは 4/400[mil/cpsi]の正方形である。中実ドームはディフューザ部内に4本の薄板を用いて固定されている。

この中実ドームの特徴として、ディフューザと中実ドームとの間の有効面積 A_e が、インレットパイプ断面積 A_o から中実ドーム下流端での有効断面積 $(A_e)_{do-end}$ まで線形に増加する。また、中心穴の断面積 A_h も同様に、下流方向に線形に増加する。

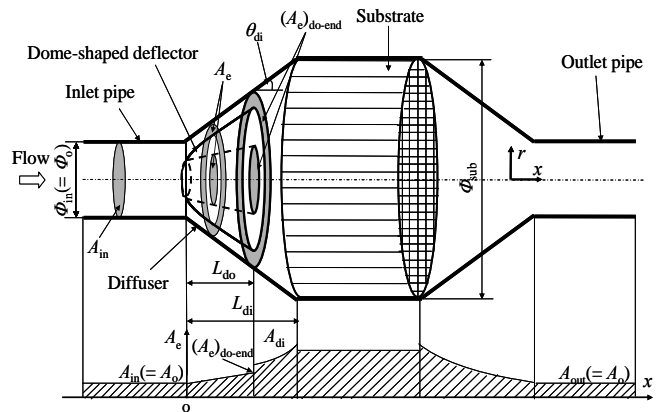
中実ドームの外形の形状を、以下に定義する。

$$\Phi_{do}^* = \frac{\sqrt{x^*}}{L_{di}^*} \sqrt{(\Phi_{di-end}^* - 1)x^* + 2L_{di}^*(\Phi_{di-end}^* - 1) + \frac{(\Phi_{di}^*)^2}{x^*} - (L_{di}^*)^2 \frac{dA_e^*}{dx^*}} \quad (1)$$

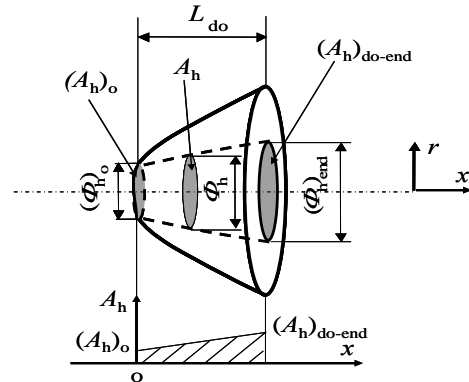
また、中実ドーム穴形状を、以下に定義する。

$$\Phi_h^* = \sqrt{((\Phi_h)_o^*)^2 + \frac{dA_h^*}{dx^*} x^*} \quad (2)$$

実験では、ディフューザの片側広がり角 θ_{di} を、一般的な 35[deg]としている。担体直径 $\Phi_{sub}(= \Phi_{di-end})$ は 82[mm] (= 3.15 Φ_o)、担体長さは 50[mm] (= 1.93 Φ_o)である。ここで、インレットパイプ直径 $\Phi_{in}(= \Phi_o)$ は 26[mm]に固定している。また、ディフューザ長 L_{di} は 40[mm] (= 1.54 Φ_o)としている。



(a) Overview



(b) Details of a dome-shaped deflector with solid structure

Fig. 1. Model⁴⁾.

この条件下で、 $dA_h^*/dx^* = 0.237$, $dA_e^*/dx^* = 1.15$, $L_{do}^* = 1.15$, $(\Phi_h)_o^* = 0.577$ の時、圧力損失を最も低減できる中実ドーム（以下、最適化中実ドーム）を得る。なお、 $Re = 7.0 \times 10^4$ の時、一般的な触媒コンバータ（以下、デフレクタ無し）に比べて22%の圧力損失低減を達成する。

比較評価の為、EDH 付き触媒コンバータの測定も行う。ここで、EDH の形状は片側広がり角 $5[\text{deg}]$ の正円錐台で、EDH 長さ L_{EDH} は中実ドーム長 L_{do} と等しく、 $1.15\Phi_o$ としている。 $Re = 7.0 \times 10^4$ の時、デフレクタ無しに比べて EDH の圧力損失低減は17%であり、最適化中実ドームより若干劣る。

最適化中実ドームは、熱容量、形状の複雑さ、質量の面から実用性に欠ける。熱容量は、エンジン始動後の触媒の浄化性能に関係し、触媒温度を短時間で効果的に高温にするために、熱容量を小さくする必要がある。複雑な形状は製造上困難な点も多く、製造コストも高くする。質量が大ききことは、大きな熱容量や高いコストに加え、相対的に見て燃費悪化につながる。そこで、著者らは、軽量で単純な構造の気流デフレクタ（以下、薄板ドーム）として、2種類の薄板構造のドームを提案した¹⁾。図2(a)は、最適化中実ドームの中心穴の壁と外側を、薄板にしたものである。図2(b)は図2(a)の中心穴の壁を無くしたものである。図2(a')は最適化中実ドームの背面に溝を設けて図2(a)を模擬し、図2(b')は中実ドーム中心穴の拡大率を大きくして図2(b)を模擬している。(図2(a'), (b')ともに、実験において図2(a), (b)の代用モデルとして試験された。) もちろん、実用的観点からは、図2(b)は図2(a)よりも有利であることは明らかであろう。結果として、図2(a) (と図2(a'))は、最適化中実ドームと同様に、圧力損失を22%低減できる。図2(b) (と図2(b'))は、最適化中実ドームと比べ若干劣るが、17%の圧力損失低減効果を実現する。今回、最適化薄板ドームとしては、図2(b)のみを考える。なぜならば、図2(a)は、最適化中実ドームと流れがよく似ており、最適化中実ドームを試験することで充分と思われるからである。

著者らは図2(b)の薄板ドーム形状の単純化を試みた¹⁾。その概略を図3に示す。単純化された気流デフレクタ（以下、薄板コーン）は薄板ドームよりはるかに単純形

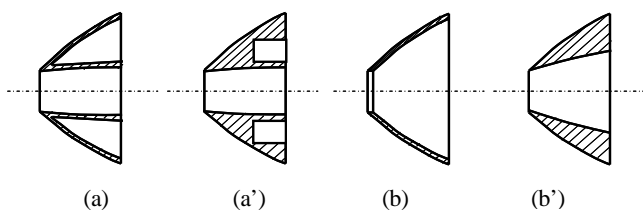


Fig. 2. Variations of a dome-shaped deflector with solid structure¹⁾.

状である。中実ドームの最適化⁴⁾と同様に、圧力損失を低減させる様に薄板コーンの最適化を行った。その結果、コーン片側広がり角 $\theta_{co} = 33[\text{deg}]$ 、無次元コーン穴直径 $(\Phi_h)_o^* = 0.708$ 、無次元コーン長 $L_{co}^* = 1.15$ で最適化薄板コーンを得た。最適化薄板コーンは、デフレクタ無しに比べて、圧力損失を最適化薄板ドーム（図2(b)）と同じ17%に削減することが可能である。

2.2. 実験装置

試験流体は室内空気であり、ブローから充分長いストレートパイプを経て触媒コンバータに流入する。ストレートパイプ長さ L_{in} 、直径 Φ_{in} ($= \Phi_o$) の比 $L_{in}/\Phi_{in} = 38.5$ とし、発達した乱流速度分布を得ることを確認した。

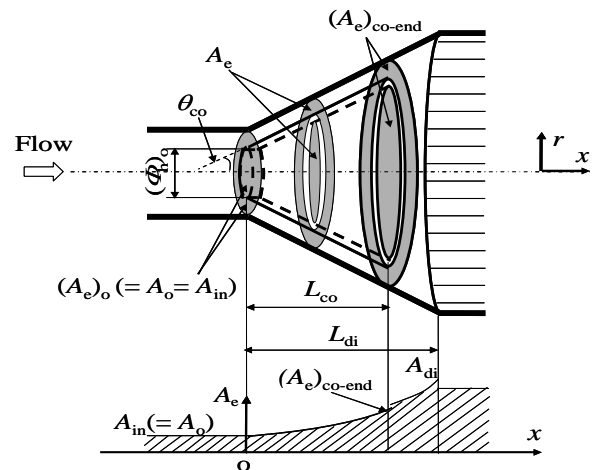


Fig. 3. A variation of a dome-shaped deflector with shell structure in Fig. 2(b): a cone-shaped deflector, whose outer configuration is formed by thin shell¹⁾.

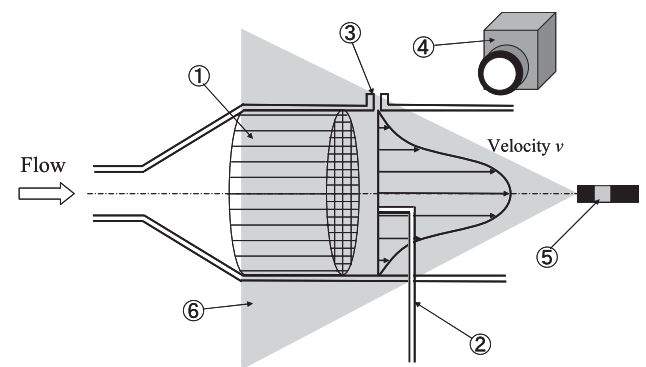


Fig.4. Experimental apparatus for velocity-profile measurements. ①Substrate, ②Pitot tube, ③static-pressure hole, ④high-speed video camera, ⑤YAG laser, ⑥laser sheet.

静圧孔を触媒コンバータの上流と下流に設ける。これらの静圧力の差 ΔP は、液柱型圧力計で測定する。上流と下流の静圧孔は、それぞれ、インレットパイプ、アウトレットパイプの壁に90[deg]間隔で4つあけられている。それらの位置は、触媒コンバータ上流端、下流端から50[mm] ($= 1.93\Phi_0$)である。

ピトー管と粒子画像流速計(PIV)による担体下流での速度分布測定の概略を、図4に示す。速度分布測定では、触媒コンバータの縮小部分をなくし、アウトレットパイプ直径を担体①の直径と等しくしている。

ピトー管による測定では、ピトー管②からの全圧と、壁にあけた4つの静圧孔③からの静圧の差を精密微差圧計で測定し、流速を算出する。測定位置は担体下流端から120[mm] ($= 4.62\Phi_0$)であり、 $x = 210$ [mm] ($= 8.08\Phi_0$)の位置としている。

PIVでの測定は、下流側から上流方向に向けてYAGレーザー⑤をシート状⑥に照射する。実験装置の上流端より、煙発生装置で生成したグリコール煙を挿入し、担体下流の流れを可視化する。この流れをハイスピードビデオカメラ④で撮影する。得られた画像をPIV解析することにより、速度ベクトル図と渦度分布図を得る。

2.3. パラメータ

レイノルズ数 Re を、以下に定義する。

$$Re = \frac{\Phi_0 V_0}{\nu} \quad (3)$$

無次元圧力損失 ΔP^* は、触媒コンバータ全体の圧力損失 ΔP をインレットパイプの動圧で除したものであり、定義は以下の通りである。

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P}{\rho V_0^2 / 2} \quad (4)$$

ここで、 ρ は密度、 V_0 はインレットパイプの平均流速である。

速度一様性指数 γ を、担体下流の速度分布の標準偏差を考慮して、以下の様に定義する。ここで、著者らは、Caiserら⁸⁾の定義に、さらに半径の重みを考慮して定義している。なお、速度分布がより一様なほど、 γ はより1に近づく。

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(v_i - V_{out})^2}{V_{out}^2} \left(\frac{r_i}{\Phi_{sub}/2} \right)^2} \quad (5)$$

$$V_{out} = \frac{4Q_{out}}{\pi \Phi_{sub}^2} \quad (6)$$

3. 結果と考察

3.1. 時間平均速度分布

まず、圧力損失低減に成功した気流デフレクタ担体後流の速度分布改善効果を示す。速度分布測定は、最適化中実ドーム、最適化薄板ドーム($dA_h^*/dx^* = 1.45$ の中実ドームで代用)、最適化薄板コーン、デフレクタ無し、EDHの五通りで行なった。図5に、今回調べる五通りについての圧力損失を示す。

ただし、デフレクタ無しに比べると、他の四つすべてが、調べた Re の範囲 ($Re \cong 1.0 \times 10^4 - 7.0 \times 10^4$) の全てにわたり、顕著な圧力損失低減を示す。(文献^{1,4)}を参照)。

図6に時間平均速度分布の計測結果を示す。結果は、 $x = 210$ [mm]の位置でピトー管をトラバースすることにより、測定している。 Re は、すべて、 5.0×10^4 と一定にしている。なお、横軸は担体半径 $R (= \Phi_{sub}/2)$ で無次元化している。

図より、デフレクタ無しの場合、流れがほとんど中心部分($r/R \cong 0$)に偏り、外周部分 ($r/R = 0.6 - 1.0$)の流速は非常に遅いことがわかる。EDHについても、デフレクタ無しの場合とよく似ており、流れは中心部分に集中する。ただし、 $r/R < 0.2$ での流速は、デフレクタ無しよりも少し遅い。

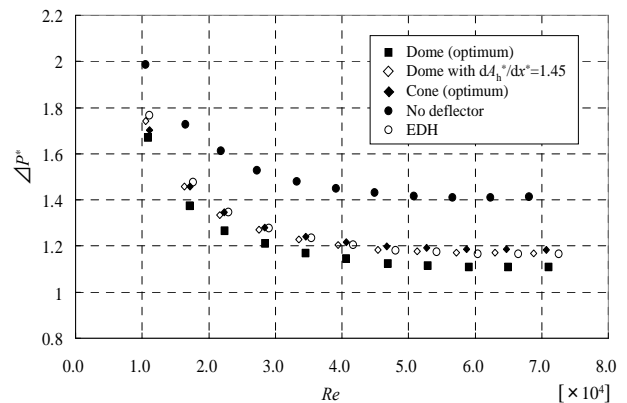


Fig. 5. Performance of flow deflectors for velocity-distribution measurements^{1,4)}.

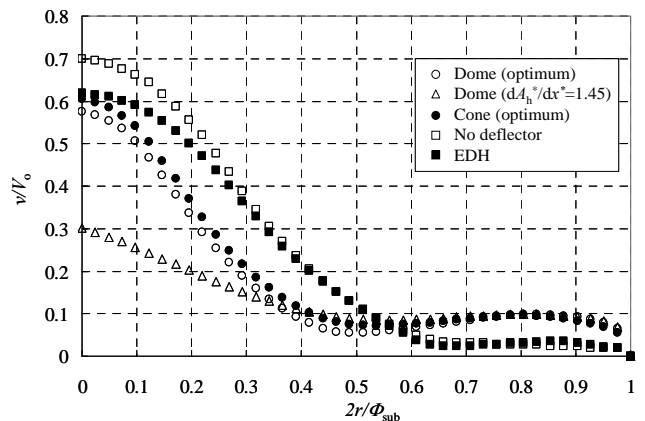


Fig.6. Flow distribution by a Pitot-tube velocimetry ($Re = 5.0 \times 10^4$, $x = 210$ [mm]).

気流デフレクタをディフューザ部に挿入すると、デフレクタ無しに比べて中心部分($r/R = 0 - 0.55$)の流量が外周部分($r/R = 0.55 - 1.0$)に推移する。以上の傾向は、調べた三つの気流デフレクタですべて確認できる。さらに、最適化薄板ドーム($dA_h^*/dx^* = 1.45$ の中実ドームで代用)では、他の二つと比べても中心部分への流れの集中はさらに緩和されており、一層の速度分布改善が見られる。なお、連続式の保存則に関する流量の誤差については、後に示す。

速度分布の一様化を数値的に評価するために、図6より速度一様性指数 γ を求める。その結果を、表1に示す。最適化中実ドームと最適化薄板コーンでは、デフレクタ無しに比べて、 γ が、それぞれ、20%と19%改善している。最適化薄板ドーム($dA_h^*/dx^* = 1.45$ の中実ドームで代用)では、 γ の改善が著しく、デフレクタ無しに比べて27%向上しており、図6の結果によく対応している。なお、EDHについては、 γ の改善はほとんど見られない。

表1には、実験精度確認の為、 γ に加えて、インレットパイプとアウトレットパイプにおける流量差 ΔQ も示している。インレットパイプでの流量 Q_{in} は、速度分布がコンバータ上流で1/7乗則と一致することを確認した後、パイプ中心速度を計測することにより求めている⁴⁾。アウトレットパイプでの流量 Q_{out} は、図6の速度分布から台形積分を行って求めている。流量誤差 $\Delta Q/Q_{in}$ は11%以下であることが確認できる。図6との対比を考えたとき、対応する断面積が外周部分ほど大きく、中心部分ほど小さいことを、注意する必要がある。よって、図6では、 $r/R \approx 0$ での誤差が実験以上に強調されている。誤差の主要因としては、ピトー管の断面積が小さいとは言え有限であるために、速度勾配の大きい部分を実際よりも大きく測定していることが考えられる。

3.2. 瞬間流れ場

次に、時間平均ではなく、各瞬間の流れを観察する。この目的の為に、流れの可視化とPIV解析を実施する。なお、明瞭な流れの可視化写真を得るため、以下の結果は、すべて、 $Re = 1.7 \times 10^4$ で実施されたものである。(ここで、 Re 効果は定性的議論に影響を及ぼさないと考えられる。詳しくは、図8を参照されたい。)

一般に、PIV解析は、各瞬間の平面情報を得ることができるが、ピトー管計測に比べて精度や信頼性が格段に劣っている。そこで、予備実験を実施した。図7には、デフレクタ無しの時の、PIVとピトー管測定による時間平均速度分布を示す。ここで、ピトー管測定でも $Re = 1.7 \times 10^4$ 、 $x = 210$ [mm](担体下流端から120[mm])($= 4.62\phi_0$)の位置)で測定し、PIV測定と同じ条件にしている。図から、PIVとピトー管による測定は、よく一致している

Table 1. Flow-uniformity factor γ and difference ΔQ between the flow rates at the inlet pipe and the outlet pipe (by a Pitot-tube velocimetry, $Re=5.0 \times 10^4$, $x=210$ [mm]).

	γ	$\Delta Q/Q_{in}$ [%]
Dome (optimum)	0.89	3.7
Dome ($dA_h^*/dx^*=1.45$)	0.94	0.4
Cone (optimum)	0.88	10.6
No deflector	0.74	8.8
EDH	0.75	3.8

ことがわかる。もっとも、外周部分($r/R = 0.9 - 1.0$)で、PIVはピトー管に比べて若干小さい値を示す。この原因としては、測定位置の断面でのパイプ曲率による光屈折の影響のため、実際よりも内側の流速を測定していることが考えられる。

瞬間流れ場の観察は、デフレクタ無し、最適化中実ドーム、非最適化中実ドーム($dA_e^*/dx^* = 1.73$, $dA_h^*/dx^* = 0.0$ (straight hole)), 最適化薄板ドーム($dA_h^*/dx^* = 1.45$ の中実ドームで代用)の四通りで行った。図8に、今回調べる四通りについての圧力損失を示す。

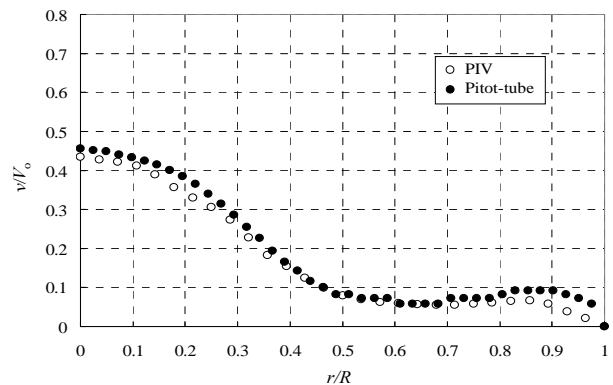


Fig.7. Comparison between PIV and Pitot-tube results (with no deflector, $Re = 1.7 \times 10^4$, $x=210$ [mm]).

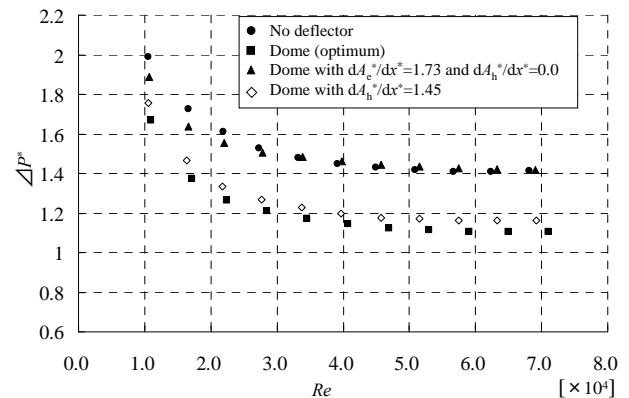


Fig. 8. Performances of deflectors for PIV analyses^{1,4)}.

最適化中実ドームは、最も高い圧力損失低減効果を示す。非最適化中実ドームは、低減効果のない例 (= デフレクタ無しとほぼ同程度の圧力損失を示す例)として試験された。最適化薄板ドームは、圧力損失低減効果は最適化中実ドームよりも若干劣るが、表1で示した様に速度分布一様化効果はより優れている。なお、PIV解析は $Re = 1.7 \times 10^4$ で実施したが、この Re で、上述の特性は保たれていることも図から確認できる。

図9-13は、ある瞬間での速度ベクトル図と渦度分布図である。まず図9にデフレクタ無しの場合を示す。流れ場は、ほぼ軸対称で、かつ、ほぼ定常(弱い乱れ成分はあるが)である。流れは中心部分に集中し、外周部分ではほとんど流れていない。それに対応して、中心付近に強い環状せん断層が存在し、壁面付近に弱い環状せん断層が存在している。

図10は、最適化中実ドームの場合の流れ場を示す。軸対称性と定常性は、図9よりも少し損なわれており、特に中心部分で、その傾向は著しい。さらに、図9と比較して、中心部分の流速が減少し、壁面付近の流速が大きくなる。後者の特徴に対応して、壁面付近により強い環状せん断層が存在し、かつ、 $r/R \cong 0.8$ の位置に逆符号の渦度を持つ弱い環状せん断層が存在している。

図11と図12は異なる瞬間の非最適化中実ドームの場合の流れ場を示す。圧力損失はデフレクタ無しの場合とほぼ同等であるが(図8を参照)、流れ場はかなり異なる点がある。興味深い。すなわち、非軸対称性と非定常性(特に中心部分)、中心付近の流速減少、外周部分の流速増加、すべてが図10よりも(そして、もちろん図9よりも)顕著になる。

図13は、最適化薄板ドーム($dA_h^*/dx^* = 1.45$ の中実ドームで代用)の場合の流れ場を示す。外周部分での流速増加は、他の気流デフレクタの場合とよく似ている。しかし、中心部分での非軸対称性と非定常性は、非常に強く、もはや環状せん断層と近似することはできない。さらに、中心付近の流速減少については、非定常性が強いこともあり、瞬間平均流れ場(図6)を見るよりも、各瞬間ではずっと顕著である。表1に示された様な速度分布一様化効果は、この様にして強く現れたのである。図13を図10と比べる時、同程度の圧力損失低減効果と速度分布一様化効果が得られる場合であっても、瞬間的流れ場が大きく異なる点は、気流デフレクタ設計時に特に注意が必要となろう。

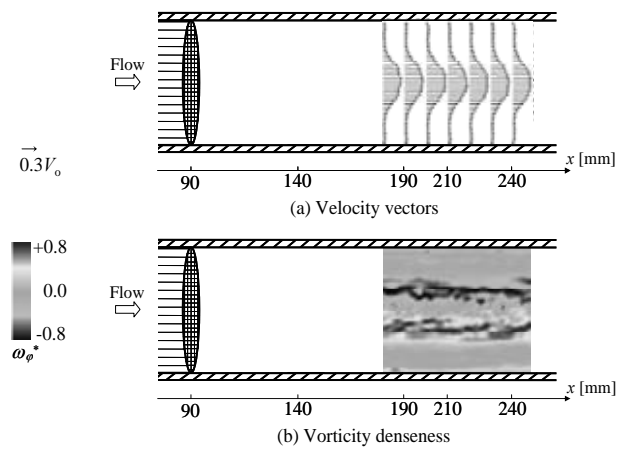


Fig.9. Velocity vectors and vorticity density by PIV (with no deflector, $Re = 1.7 \times 10^4$).

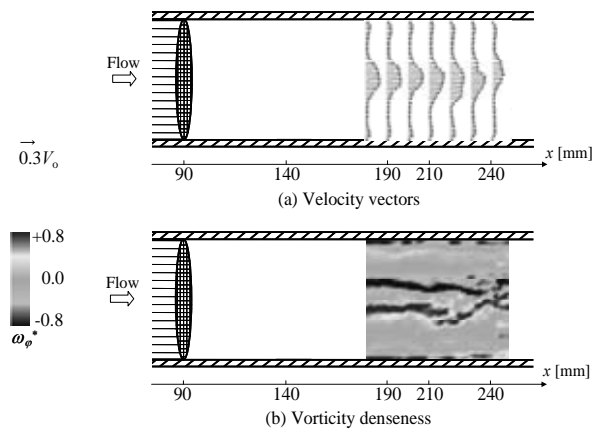


Fig.10. Velocity vectors and vorticity density by PIV (with the optimum dome, $Re = 1.7 \times 10^4$).

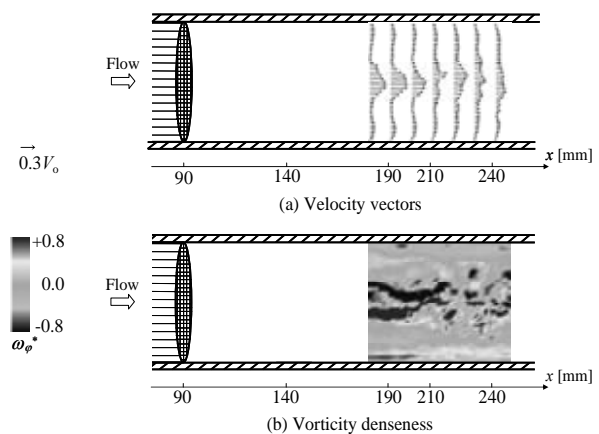


Fig.11. Velocity vectors and vorticity density by PIV (with a dome of $dA_e^*/dx^* = 1.73$, $dA_h^*/dx^* = 0.0$ (straight hole), $Re=1.7 \times 10^4$, $tV_0/\Phi_0=0.0$).

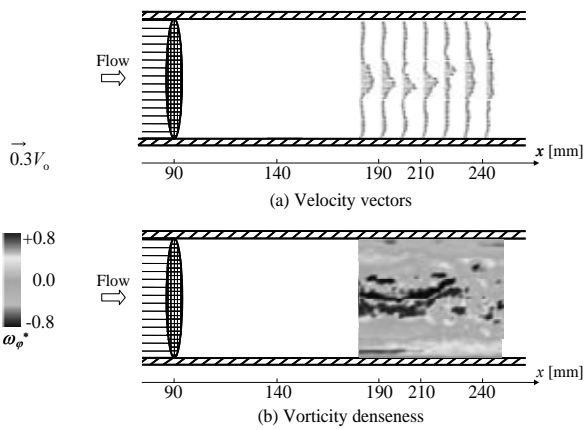


Fig.12. Velocity vectors and vorticity density by PIV (with a dome of $dA_e^*/dx^* = 1.73$, $dA_h^*/dx^* = 0.0$ (straight hole), $Re=1.7 \times 10^4$, $tV_0/\Phi_0=1.8$).

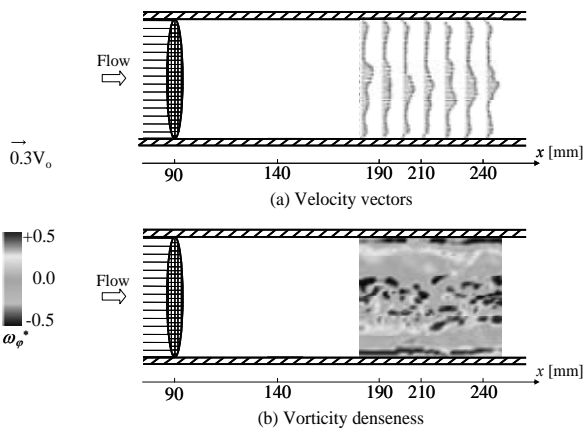


Fig.13. Velocity vectors and vorticity density by PIV (with a dome of $dA_h^*/dx^* = 1.45$, $Re=1.7 \times 10^4$).

4. おわりに

1. 最適化中実ドームおよび最適化薄板ドーム、最適化薄板コーンの担体後流の速度分布は、それぞれ、デフレクタ無しに比べて γ を20%および27%、19%改善する。よって、触媒浄化機能の向上が充分期待できる。
2. デフレクタ無しの場合、流れは中心部分にのみ集中し、外周部分ではほとんど流れていない。また、流れは弱い乱れ成分を含んでいるが、おおむね軸対称かつ定常的である。一方、気流デフレクタを設置すると、壁面付近の流速が大きくなる。ただし、流れの非軸対称性や非定常性が強められるのは、主に、中心部分のみである。非軸対称性や非定常性の程度は、気流デフレクタの形状に大きく依存し、圧力損失の値だけから推定すること

は難しい。最適化薄板ドーム(実験では、 $dA_h^*/dx^* = 1.45$ の中実ドーム)で γ が大きな値を示すのは、この中心部での非軸対称性や非定常性が強まったことに関係していることを確認した。

本研究は、一部、文部科学省学術フロンティア推進事業「次世代ゼロエミッション・エネルギー変換システム」の支援を受けた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) S. Tanaka, H. Tanigawa, J. Funaki and K. Hirata A new approach for pressure loss reduction and velocity profile improvement in automotive catalytic converters, JSAE Annual Congress (Spring), **82-07**, 9-13 (2007).
- 2) D. W. Wendland, P. L. Sorrell and J. E. Kreucher, Sources of Monolith Catalytic Converter Pressure Loss, SAE Paper, **912372**, 1-14 (1991).
- 3) D. W. Wendland, J. E. Kreucher and E. Andersen, Reducing Catalytic Converter Pressure Loss with Enhanced Inlet-Header Diffusion, SAE Paper, **952398**, 13-23 (1995).
- 4) K. Hirata, M. Ota, R. Oda, H. Tanigawa and J. Funaki, On a Novel Diffuser for Efficient Automotive Catalytic Converters, JSME Int. J., Series B, **49**, 1206-1211 (2006).
- 5) C. D. Lemme and W. R. Givens, Flow Through Catalytic Converters – An Analytical and Experimental Treatment, SAE Paper, **740243**, 1-13 (1974).
- 6) J. S. Howitt and T. C. Sekella, Flow Effects in Monolithic Honeycomb Automotive Catalytic Converters, SAE Paper, **740244**, 1-9 (1974).
- 7) D. W. Wendland, W. R. Matthes and P. L. Sorrell, Effect of Header Truncation on Monolith Converter Emission-Control Performance, SAE Paper, **922340**, 211-223 (1992).
- 8) W. Maus and R. Bruck, The Conical Catalytic Converter-Potential for Improvement of Catalytic Effectiveness, SAE Paper, **982633**, 1-7 (1998).
- 9) G. Caizer, J. Oesterle, J. Braun and P. Zacke, The Progressive Spin Inlet – Homogeneous Flow Distributions Under Stringent Conditions, SAE Paper, **2003-01-0840**, 1-15 (2003).