

高効率自動車用コンバータ内流れのCFDによる解明と研究開発

Research and Development on Flow in High Effective Converter for Automobile by CFD

研究代表者 工学部知能機械工学科 教授 児島 忠倫
Tadatomo Kojima

共同研究者 近畿大学 研究員 楊 念儒
Nianru Yang

トヨタテクニカルディベロップメント(株) 吉川 香織
Kaori Yoshikawa

The car is one that is not possible to separate from our life. However, an increase of automobile emissions causes air pollution and acid rain, which becomes a environmental problem. To solve this problem, the development of the eco-car is needed.

The converter is a device that makes a hazardous substance from the automobile emissions reacting to a catalyst chemically, and makes it comparatively converted into a harmless substance. The vehicle exhaust emission has concentrated on the center part of the converter generally used now. The automobile emission doesn't flow to the wall side of the converter so much. Therefore, the catalyst in the converter is not efficiently used.

If the automobile emission passes uniformly through the converter, the catalyst is used efficiently. In addition, the cost of expensive catalyst can be saved by decrease in amount of using.

In this paper, the flow of the automobile emission was verified by the difference of the manifold converter shape in the numerical simulation. The converter that made the automobile emission reacting efficiently to the catalyst was designed.

1. 緒言

自動車は私たちの生活とは切り離せないものの一つとなっているが、自動車の排気ガスの増加は、大気汚染や酸性雨の発生原因ともなり、問題となっている。環境保全性の高い自動車の開発が必要となっている。

コンバータ⁽¹⁾⁽²⁾とは排気ガス中の有害な窒素酸化物等の物質を内部にある触媒と化学反応させ、比較的無害な窒素や二酸化炭素等の物質に変換させる装置である。現在一般的に使用されているコンバータは、コンバータ中心部に排気ガスが集中して流れるため、コンバータ外側の触媒に排気ガスがあまり流れておらず、コンバータ内の触媒が効率よく使われていない。

排気ガスが触媒の外側にも均一にコンバータ内を通るようになれば、触媒全体が効率よく使われ、高価な触媒を減らすことが出来、コストダウンにもつながる。

今回は数値シミュレーションを利用したマニホールドコンバータの形状の違いが与える排気ガスの流れの影響について検証し、効率よく触媒全体が排気ガスと反応するようなコンバータを考案した。

2. 解析モデルおよび方法

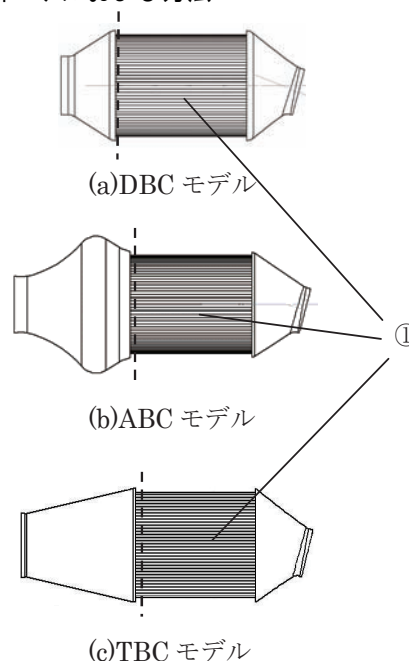


図1 解析モデルおよび断面表示位置

図1(a)は、現在市場にもっとも出回っているタイプのコンバータのモデルである。図(b)は新たに考案

したタイプのコンバータのモデルであり、触媒入口部分にふくらみがあるのが特徴である。図(c)はコンバータ入口から触媒入口の距離を長くしたモデルであり、その長さは(b)と等しい。なお①の部分が触媒部分である。

本解析では、基礎方程式として、運動量保存式 (Navier - Stokes 方程式)、質量保存の式、エネルギー保存式を使用し、さらに有限体積法を用いて解析を行った。本解析は図1に示す3次元モデルを用いた。解析メッシュ数は、各モデルによって異なるが、要素の形は、多面体を用いた⁽³⁾⁽⁴⁾。流体には 1m/s, 3m/s, 5m/s, 7m/s, 10m/s の流速 U を与えた。

3. 解析結果および考察

3.1 断面流速

図 2(a), (c), (e)に速度ベクトル図および図 2(b), (d), (f)に ABC モデル, DBC モデルと TBC モデルの図 1(a), (b), (c)の断面位置での流速の断面図を示す。解析条件はコンバータ入口部分に流速 $U=1\text{m/s}$ で空気が流れ込んでいる。

図 2(a)は、壁面に沿って流れていた空気がはく離

し、触媒入口直前で渦が形成されている。

図 2(c)は、コンバータ入口から入った空気の流れが壁面に沿って流れ、その後はく離しコブの中より若干触媒に近い部分で渦を形成している。その後触媒内にまっすぐ入っていく様子がわかる。

図 2(e)は、触媒入口直前での渦は見られず、壁面に沿って空気が流れ込んでいる。触媒部分は ABC, DBC モデルと比較すると全体的に緑色で流速が速くなっている。

図 2(b)は、触媒外側の部分が青く、中央の部分が緑色になっている。明るい青色の部分が多く見られ、中央の緑色の部分はいびつな形状になっている。

図 2(d)は、触媒外側の部分が青くなり中央部分に向かって少しずつ色が薄くなり、濃い緑色に近づいている。

図 2(f)は、触媒外側の部分が青色になり、(b)とよく似ている。

図 3(a), (c), (e)に速度ベクトル図および図 3(b), (d), (f)に ABC モデル, DBC モデルと TBC モデルの図 1(a), (b), (c)の断面位置での流速の断面図を示す。解析条件はコンバータ入口部分に流速 $U=10\text{m/s}$

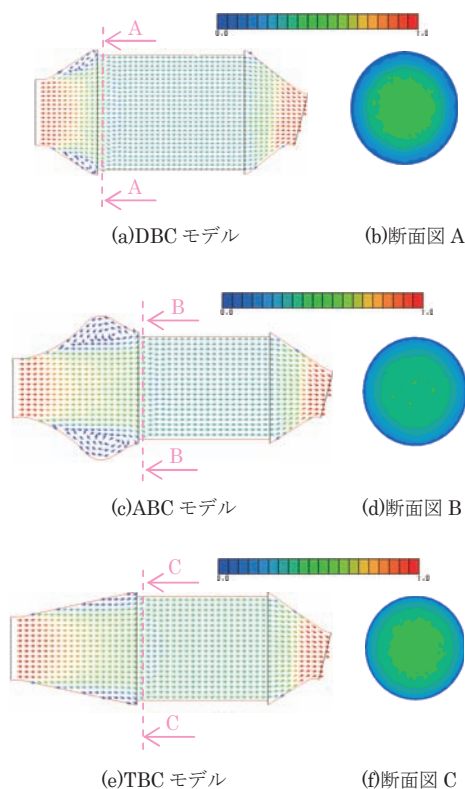


図 2 速度ベクトル図, 断面図, 流速 $U=1\text{m/s}$

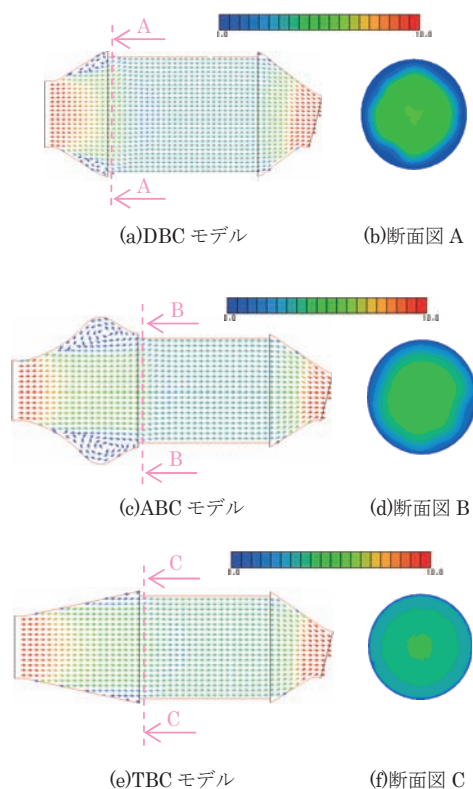


図 3 速度ベクトル図, 断面図, 流速 $U=10\text{m/s}$

で空気が流れ込んでいる。

図 3(a)は、壁面に沿って流れていた空気が、はく離し触媒入口直前で渦が形成されている。

図 3(c)は、コンバータ入口から入った空気の流れが壁面に沿って流れ、その後はく離しコブの中で渦を形成している。その後触媒内にまっすぐ入っていく様子がわかる。図 3(e)は、触媒入口直前での渦は見られず、壁面に沿って空気が流れ込んでいる。触媒部分は ABC, DBC モデルに比較すると全体的に緑色で流速が速くなっている。

図 3(b)は、触媒外側の部分が青く、中央の部分が明るい緑色になっている。青と明るい緑色との色の差ははっきり出ている。

図 3(d)は、触媒外側の部分が青くなり中央部分に向かって少しずつ色が薄くなり、濃い緑色に近づいている。

図 3(f)は、触媒外側の青色が少しだけ見られ他の 2 つよりも緑色の部分が 3 層に分かれて広がっている。

3.2 断面の流速分布図

図 4 は、流速 $U=1\text{m/s}$ での DBC モデル, ABC モデルと TBC モデルの触媒断面の流速分布図である。縦軸は流速 U , 横軸は触媒中心からの距離 r を直径 d で除した値であり、図 1 (a), (b), (c)の破線上の流速分布を示す。

図 4 から、3 つのモデルすべて最高流速は触媒断面の中央部分で見られる。3 つのモデルともほぼ同じ形状をとることが分かるが、DBC と TBC の最高流速は約 0.42m/s と同じくらいなのに対し、ABC は約 0.38m/s と若干遅い。 $0.3 \leq r/d \leq 0.5$ の部分では、TBC モデルと ABC モデルに比べ、DBC モデルの方が若干流速は遅めである。

図 5 は、流速 $U=10\text{m/s}$ での ABC モデル, DBC モデルと TBC モデルの触媒断面の流速分布図である。

図 5 から、3 つのモデルすべて最高流速は触媒断面の中央部分で見られ、ABC, TBC モデルの最高流速はほぼ同じである。ABC, TBC は図 4 と似た形状をしているが $-0.48 \leq r/d \leq -0.33$, $0.3 \leq r/d \leq 0.5$ の部分では TBC の方が ABC よりも流速が若干速い。それに対し DBC は中央部分の流速が 1.0m/s ほど速く、 $-0.5 \leq r/d \leq -0.4$, $0.3 \leq r/d \leq 0.5$ の部分の流速が 2 つのモデルに比べ遅くなっていることが特徴である。

図 4, 図 5 から流速の大きさに違いは見られるが、流速が遅いときには流速分布は 3 つのモデルとも似た形状を取り、流速が速くなると、DBC では触媒中央部分の流速が速く触媒の触媒外側の部分の流速は遅くなる傾向が見られた。

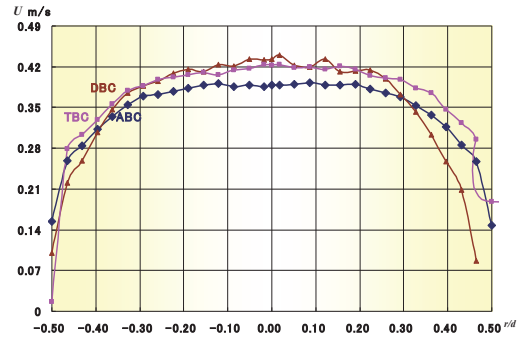


図 4 触媒断面の流速分布図
流速 $U=1\text{m/s}$

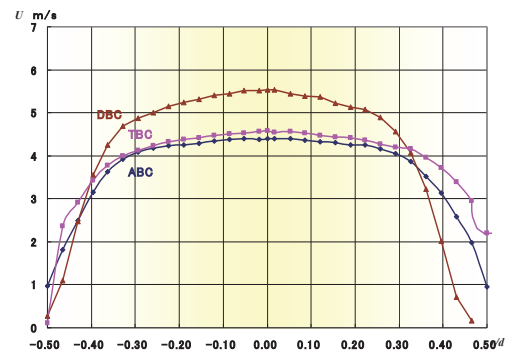


図 5 触媒断面の流速分布図
流速 $U=10\text{m/s}$

3.3 断面流速の面積割合

図 6(a), (b), (c)から図 10(a), (b), (c)までにそれぞれ図 1(a), (b), (c)の断面位置で断面図を示す。なお表示は図 3(b), (d), (f)での DBC モデル, ABC モデルと TBC モデルの表示とは異なり、コンバータ入口で与えた流速 U の 6 割を最高流速とし、それらを 6 段階に分けて表示にしている。また表 1 から表 5 に 6 段階に分けた流速の面積分布が触媒断面に占める割合を示す。流速は $U=1, 3, 5, 7, 10\text{m/s}$ である。触媒断面の流速分布の流速毎の変化と触媒断面に占める 6 段階に分けたそれぞれの流速の面積割合を求め、解析結果をさらに詳しく分析する。面積算出には面積計と計算ソフト AreaCulc(Digital Data Service) を使用した。

図 6(a), (b), (c)の流速 $U=1\text{ m/s}$ の場合を示す. (a), (b), (c)ともに $0.5\sim 0.6\text{ m/s}$ の赤色の部分は見られない. (b)においては $0.4\sim 0.3$ の黄色の部分もほぼ見られず, $0.2\sim 0.3\text{ m/s}$, $0.3\text{ m/s}\sim 0.4\text{ m/s}$ の緑の部分が大半を占める. (a)と(c)は $0.4\sim 0.5\text{ m/s}$ の黄色の部分ほぼ同じ面積でよく似た流速分布となっているが, $0.3\sim 0.4\text{ m/s}$ の黄緑色の面積は(c)の方が広く, (a)の方が $0.2\sim 0.3\text{ m/s}$ の緑色, $0.1\sim 0.2\text{ m/s}$ の水色, $0.0\sim 0.1\text{ m/s}$ の青色の部分が多くなっている. 表 1 から(a), (b), (c)すべてのモデルで $0.3\sim 0.4\text{ m/s}$ の面積が最大となり, (b)では 62.5%を占める.

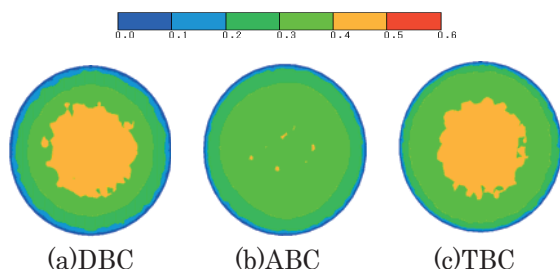


図 6 流速分布の断面図流速 $U=1\text{ m/s}$

表 1 面積割合(%) 流速 $U=1\text{ m/s}$

流速(m/s) \ モデル名	DBC-R1	ABC-R1	TBC2-1
0.5~0.6	0	0	0
0.4~0.5	28.7	0.2	29.3
0.3~0.4	31.0	62.5	49.0
0.2~0.3	25.4	28.7	13.9
0.1~0.2	9.2	5.8	5.0
0.0~0.1	5.6	2.7	2.8

図 7(a), (b), (c)の流速 $U=3\text{ m/s}$ の場合を示す. (a), (b), (c)ともに $0.5\sim 0.6\text{ m/s}$ の赤色の部分は見られない. (a)と(c)は $1.2\sim 1.5\text{ m/s}$ の黄色の部分ほぼ同じ面積を占めるが, (a)は(c)よりも水色と青色の部分ははっきりと見られる. 表 2 から(a)では $1.2\sim 1.5\text{ m/s}$ の流速分布が一番多く 43.2%を占めているが, (b)では $0.9\sim 1.2\text{ m/s}$ の黄緑色の部分が $1.2\sim 1.5\text{ m/s}$ の黄色の部分よりも若干多くさらに $0.9\sim 1.2\text{ m/s}$, $0.6\sim 0.9\text{ m/s}$ の合計が 68.9%と流速 $U=1\text{ m/s}$ のときと同じく緑の部分が大半を占める.

図 8 の(a), (b), (c)の流速 U が 5 m/s の場合を示

す. (a)で $2.5\sim 3.0\text{ m/s}$ の赤色の部分が見られる. (b), (c)はほぼ同じ流速分布に見えるが, (b)の方が(c)より

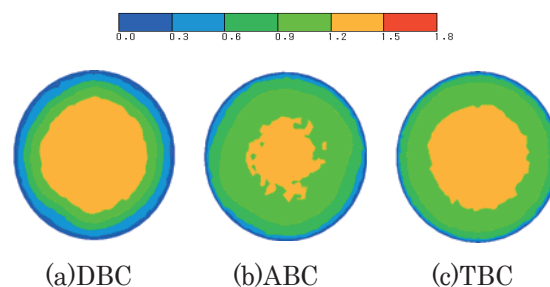


図 7 流速分布の断面図流速 $U=3\text{ m/s}$

表 2 面積割合(%) 流速 $U=3\text{ m/s}$

流速(m/s) \ モデル名	DBC-R3	ABC-R3	TBC2-3
1.5~1.8m/s	0.0%	0.0%	0.0%
1.2~1.5m/s	43.2%	18.1%	36.9%
0.9~1.2m/s	17.0%	46.0%	39.8%
0.6~0.9m/s	13.7%	22.9%	14.8%
0.3~0.6m/s	16.2%	8.6%	5.5%
0.0~0.3m/s	9.9%	4.4%	3.0%

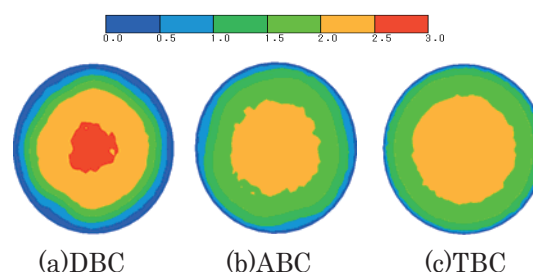


図 8 流速分布の断面図流速 $U=5\text{ m/s}$

表 3 面積割合(%) 流速 $U=5\text{ m/s}$

流速(m/s) \ モデル名	DBC-R5	ABC-R5	TBC2-5
2.5~3.0m/s	8.2%	0.0%	0.0%
2.0~2.5m/s	38.2%	30.3%	40.1%
1.5~2.0m/s	13.5%	34.1%	35.7%
1.0~1.5m/s	11.2%	20.1%	15.2%
0.5~1.0m/s	13.0%	10.6%	5.4%
0.0~0.5m/s	16.0%	4.8%	3.6%

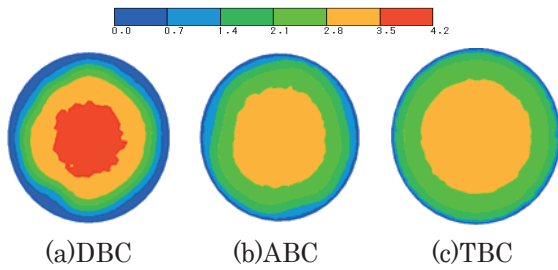


図9 流速分布の断面図流速 $U=7\text{m/s}$

表4 面積割合(%) 流速 $U=7\text{m/s}$

流速(m/s) \ モデル名	DBC-R7	ABC-R7	TBC2-7
3.5~4.2m/s	19.0%	0.0%	0.0%
2.8~3.5m/s	28.9%	35.4%	42.1%
2.1~2.8m/s	11.9%	28.4%	33.0%
1.4~2.1m/s	9.5%	17.3%	15.6%
0.7~1.4m/s	11.0%	12.4%	6.1%
0.0~0.7m/s	19.8%	6.5%	3.2%

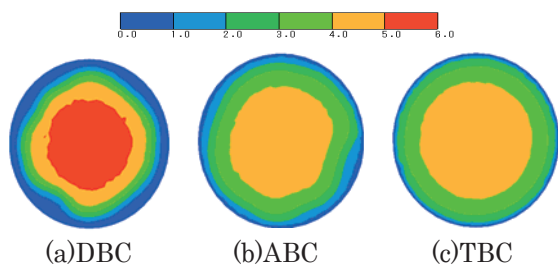


図10 流速分布の断面図流速 $U=10\text{m/s}$

表5 面積割合(%) 流速 $U=10\text{m/s}$

流速(m/s) \ モデル名	DBC-R10	ABC-R10	TBC2-10
5.0~6.0	27.8	0	0
4.0~5.0	21.3	38.8	45.6
3.0~4.0	10.2	25.2	28.7
2.0~3.0	8.9	15.7	15.8
1.0~2.0	9.6	12.7	5.7
0.0~1.0	22.3	7.5	4.2

も水色の部分が目立ち、黄緑色と緑色の部分の形がいびつになっている。表3から(a)、(c)では2.0~2.5m/sの流速分布が一番多く、(b)では1.5~2.0m/s

の流速分布が一番多い。

図9の(a)、(b)、(c)の流速 $U=7\text{m/s}$ の場合を示す。(a)で2.5~3.0m/sの赤色の部分が見られ、端の青色の部分が多く見られる。(b)では端に水色の部分が目立ち、黄緑色と緑色の部分の形がいびつになっている。(c)では触媒外側の円形に沿うように青色、水色、緑色、黄緑色、黄色の円形の分布が見られる。表4から(a)、(b)、(c)すべてで2.8~3.5m/sの流速分布が一番多く見られる。

図10の(a)、(b)、(c)のコンバータ入口の流速 $U=10\text{m/s}$ の場合を示す。(a)では赤色の分布が目立ち、水色、緑色、黄緑色、黄色の形がいびつになっている。(b)では触媒外側に水色の部分が目立ち、黄緑色と緑色の部分の形がいびつになっている。(c)では触媒外側の円形に沿うように青色、水色、緑色、黄緑色、黄色の円形の分布が見られる。表5から(a)では5.0~6.0m/sの流速分布が多く(b)、(c)では、4.0~5.0m/sの分布が多く見られる。

図6(a)、(b)、(c)から図10(a)、(b)、(c)、表1から表5より、(a)は流速 U が速くなるにつれ赤色の部分の面積と青色の面積が徐々に大きくなる。黄色、黄緑色、緑色、水色の面積は徐々に小さくなる。よって、触媒中央部分の流速が速くなり、その分布も流速 U が速くなるにつれ大きくなるのが分かった。また触媒外側の部分の空気が流れていない部分の流速分布も大きくなる。そのため最高流速と最低流速の差も大きい。

(b)は流速 U が速くなっても赤色の流速分布は見られなかった。黄色と水色、青色の分布は序所に大きくなり、黄緑色、緑色の流速分布は徐々に小さくなる。

(c)は流速 U が速くなるにつれ黄色の流速分布が大きくなり、黄緑色の流速分布は徐々に小さくなる。しかし、青色、水色、緑色の流速分布はほぼ横ばい状態である。青色の流速分布がほぼ変わらないので、(c)はすべての流速 U において触媒外側の部分にも空気が流れ込んでいると言える。

4. 考察

以上の結果を考慮すると、図1(a)の現在市場にもっとも出回っているタイプのモデルでは流速 U が速くなるにつれ、コンバータ中心部分に空気が集中して流れ、コンバータ外側の触媒に空気があまり流れていないと言う特徴が現れた。これは媒入口直前で形成された渦がコンバータ外側の触媒に入り込

もうとする空気の流れを邪魔しているためと考えられる。そして、コンバータ入口から触媒までの距離が比較的短いため、流速 $U=1\text{m/s}$ 以外触媒に流れ込むまでに流速が遅くなりならず、中央部分の流速も速くなる。

考案モデル図 1 (b)では (a)に比べコンバータ外側の触媒に空気が流れ込んでいる。これはコブの中で形成された渦が整流効果をもたらし、その後触媒内にまっすぐ入っていくためと考えられる。中央部分の流速もコンバータ入口から触媒までの距離が比較的長いため、触媒に流れ込むまでに流速が遅くなり中央部分に速い流速が集中することを防いでいる。

考案モデル図 1(c)でも(a)に比べコンバータ外側の触媒に空気が流れ込んでいる。コンバータ入口から触媒までの距離が比較的長く、壁面の形状が緩やかなため空気が壁面に沿って流れて空気がそのまま触媒外側にも流れ込んでいくためと考えられる。中央部分の流速もコンバータ入口から触媒までの距離が比較的長いため、触媒に流れ込むまでに流速が遅くなり中央部分に速い流速が集中することを防いでいる。また、(c)では触媒外側に空気の流れ込まない部分が他の2つのモデルに比べ少なく、流速 U が速くなっても流速分布に大きな変化が見られないのが特徴である。

よって、(a)に比べ(b)、(c)は流速分布が安定している。そして(b)、(c)を比較した場合、(b)の方が、中央部分の流速が遅い。(c)の方が流速 U が速くなっても安定した流速の分布が得られる。ただし、流速 $U=1\text{m/s}$ の場合は(b)の方が(c)よりも中央部分に空気が集中しない安定した流速分布となる。

5. 結言

1) ABC モデルはコブの部分に渦が形成されることで DBC モデルよりも均一に触媒内に空気が流れ込む。

2) 流速 $U=3\text{m/s}$ 以上の場合は、コンバータ入口から触媒までの距離を比較的長くすることが、触媒に流れ込むまでに流速が遅くなり中央部分に速い流速が集中することを防ぐ。

3) TBC モデルは流速 U が速くなっても中央部分に速い流速が集中せず、触媒外側に空気流れ込み、流速分布の安定した流速の分布が得られる。

4) ABC モデルが3つのモデルの中で一番中央部分

の流速が遅い。

5) 流速 $U=1\text{m/s}$ の場合は ABC モデルの方が TBC モデルよりも中央部分に空気が集中せず、触媒外側にも空気の流れ込む安定した流速分布となる。

参考文献

- (1) 細川武志：クルマのメカ&仕組み図鑑，株式会社グランプリ出版，(2005)。
- (2) 出射忠明：自動車メカニズム図鑑，株式会社グランプリ出版，(2003)。
- (3) Suhas V.Patankar：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析，森北出版，(1985)。
- (4) 大野豊，磯田和男：新版数値計算ハンドブック，オーム社，(1990)。