

触媒担体内流れと流動特性

同志社(流体力学研究室) / 舞鶴高専

平田勝哉, 太田光彦, 舟木治郎, 谷川博哉

概要

触媒コンバーターは、自動車などからの排出ガス中の有害物質を酸化 / 還元して浄化する。大気汚染物質低減に寄与する触媒コンバーターは環境面からの期待が大きい。一般に、触媒コンバーターは、排気系流路で最も圧力損失が大きく、エンジン実質出力の低下や燃料消費悪化の主要因となる。よって、触媒コンバーターの圧力損失低減は有効な環境対策である。ところが、実際の触媒コンバーターでは、エンジンからの排出ガスの温度、速度変動が触媒コンバーター中の温度分布や脈動発生などに影響を及ぼし、それに伴い流れ場も管摩擦係数も変化しており、正確な圧力損失は不明のままである。

本研究では、触媒コンバーターの特に触媒層における流れを対象にして、実験と数値解析を実施した。ここに、流体力学的には触媒層の格子状流路の 1 格子は、工業上もよく利用される充分長い正方形管あるいはダクトである。

実験では、セルサイズとセル数密度が違う 2 種類のモノリス担体、すなわち、 $4/400[\text{mil}/\text{cpsi}]$ の f の方が、 $4/600[\text{mil}/\text{cpsi}]$ の 2 種類の担体において、質量流量の変化による担体の圧力損失への影響を計測した。その結果、(1) 圧力損失は層流の特徴を示すこと、(2) 実験した 2 つの担体の f は理論値 $14.227/Re$ よりも常に大きいこと、(3) $4/400[\text{mil}/\text{cpsi}]$ の f の方が、 $4/600[\text{mil}/\text{cpsi}]$ よりも大きいことが分かった。

数値計算では、熱対流効果も考慮して、正方形ダクトについて、速度場と温度場、管摩擦係数への温度効果を見積もることを直接の目的としている。温度境界条件は、触媒コンバーターを考え、全面冷却としている。解析手法は、有限差分法を用いている。プラントル数 $Pr=0.73$ と固定し、 $RaRe = 1.0 \times 10^1$ から $RaRe = 1.0 \times 10^6$ の範囲で、数値解析を実施している。その結果、 $RaRe$ が大きいとほど、浮力の影響力が増し、熱対流は活発になる様子を、速度場、温度場ともに把握することができた。また、 $RaRe = 1.0 \times 10^4$ では、 Re は、 $RaRe$ の増加に伴い急激に増加することが確認できた。この結果は、概ね Cheng & Hwang (1969) と一致した。ここで、 Ra はレイリー数、 Re はレイノルズ数である。

触媒担体内流れと流動抵抗

平田勝哉 (同志社・流体力学研究室)
太田光彦 (同志社・流体力学研究室)
舟木治郎 (同志社・流体力学研究室)
谷川博哉 (舞鶴高専)

第1部: 実験

第2部: 数値計算

背景

環境保護への関心の高まり



自動車に対して厳しい排気規制



大気汚染物質低減に寄与する
触媒コンバーターは、環境面
においても大きく期待されて
いる。



Figure 1. An automotive catalytic converter.

背景

ところが、
排気システムの中で一番**圧力損失**が大きいのは、



触媒コンバータ

圧力損失の増大による問題

- エンジン最高出力の低下
- 燃費の悪化



圧力損失原因の理解と、
高精度評価の必要性！

背景



Figure 2. The innards of a catalytic converter.

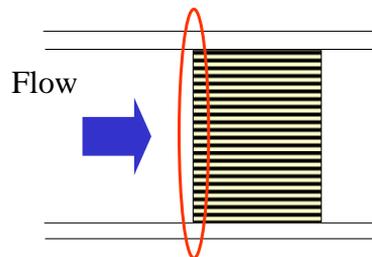


Figure 3. A cell in the innards of a catalytic converter.

触媒コンバータの触媒層（モノリス担体）における格子状流路の1格子は、流体力学的には充分長い管/ダクトに等価。

第1部:実験

触媒担体内流動抵抗の計測

平田勝哉, 太田光彦, 中森真志, 大西良平, 舟木治郎

研究目的

壁厚さ/セル密度が4/400[mil/cpsi]と4/600[mil/cpsi]の担体を用いて

- 実際の担体の圧力損失を計測.
- 理論値 $f=14.227/Re$ (Shah and London) と比較検討

実験装置

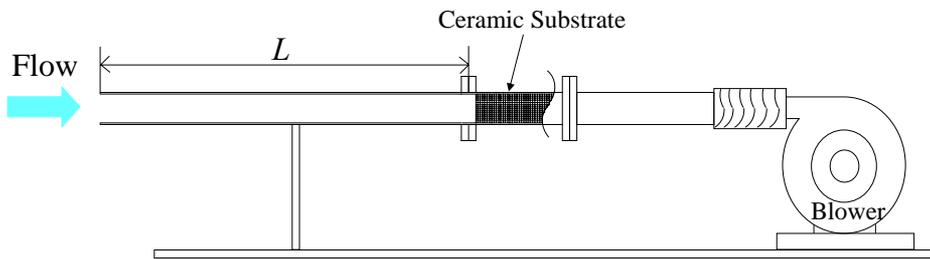


Figure 1-1. Experimental apparatus

使用流体 室温空気

セラミック担体部 82[mm] × 150,100,50[mm]
助走区間 L 3000[mm]

実験装置 (詳細)

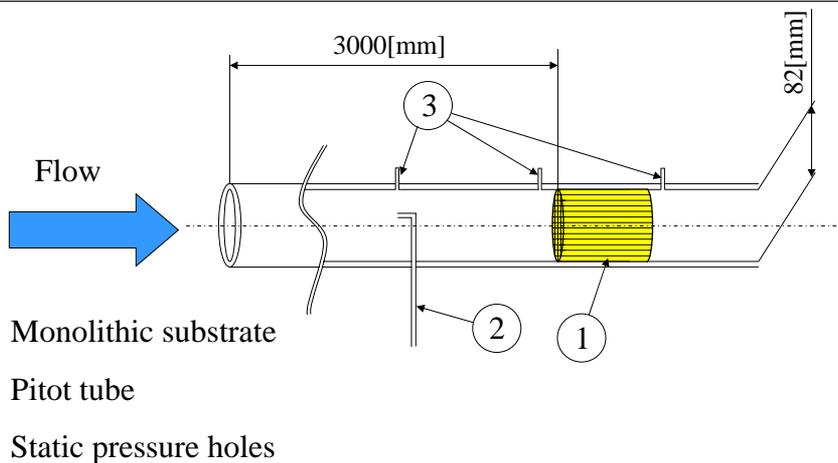


Figure 1-2. Experimental Apparatus (in details).

試験担体 (写真)

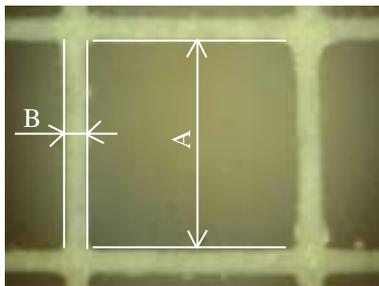


Table 1-1. Principal specifications of tested substrates

Substrate Type(mil/cpsi)	4/400	4/600
Substrate Size A(mm)	1.17	0.94
Wall Thickness B(mm)	0.10	0.10
Open Frontal Area(%)	85	81

Figure 1-3. The macrograph of monolithic substrate

セラミック担体



コーゼライトをハニカム状に押出成形

本研究では触媒が担持されていないものを使用

試験担体

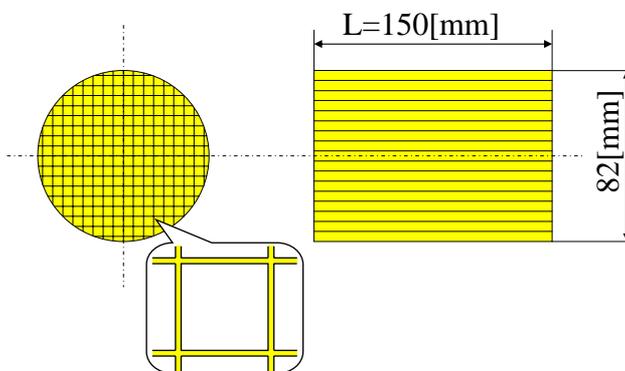


Table 1-2. Parameters of tested substrates

Cell structure [mil/cpsi]	4/400	4/600
Flow-passage wall thickness [mm]	0.102	0.102
Open frontal area α [%]	84.6	81.4
Hydraulic radius r_h [mm]	0.292	0.234

定義式

•流速 V [m/s]の算出

$$V = \sqrt{\frac{2(P_c - P)}{\rho}}$$

P_c は総圧 [Pa]

P は静圧 [Pa]

ρ は流体密度[kg/m³]

•レイノルズ数 Re の定義

$$Re = \frac{4mr_h}{\alpha\mu A}$$

m は質量流量[kg/s]

r_h は動水半径[m]

α は開口率

μ は粘度[Pa·s]

A は担体断面積[m²]

• $f \cdot Re$ の算出

$$f \cdot Re = \frac{P}{[L/8\alpha r_h^2 A] [m\mu/\rho]}$$

f は摩擦係数

P は担体の圧力損失 [Pa]

L は担体長さ[m]

質量流量の影響

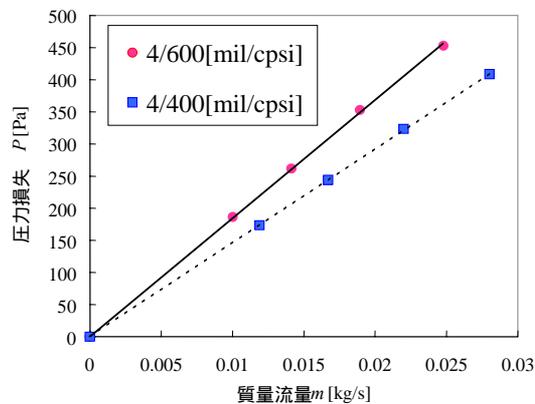


Figure 1-2. Pressure loss against flow rate.

線形性は良好(損失は流速に比例) → ほぼ層流



注意: 同じ m なら
4/600[mil/cpsi]のほうが P
が大きい → 後述.

f と Re との関係

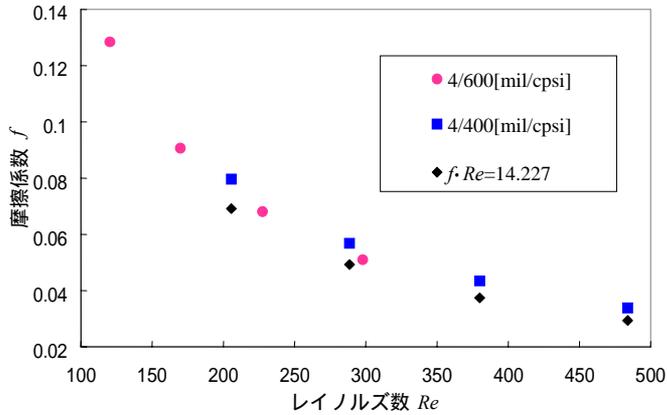


Figure 1-3. Friction factor against Reynolds number.

両担体とも理論値14.227とほとんど一致。(ほぼ層流)

次に

担体ごとの f ,あるいは理論値の f との違いを,より精密に観察してみた.

$f \cdot Re$ と Re の関係

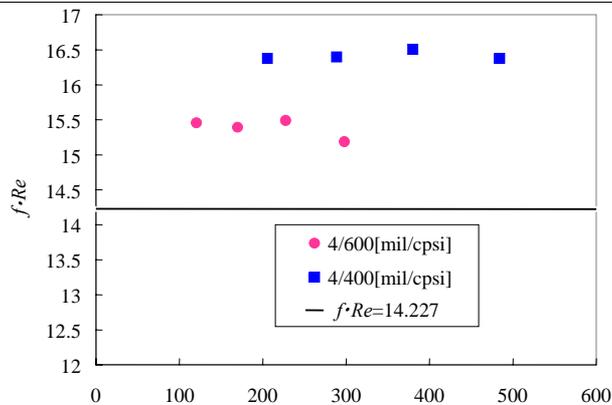


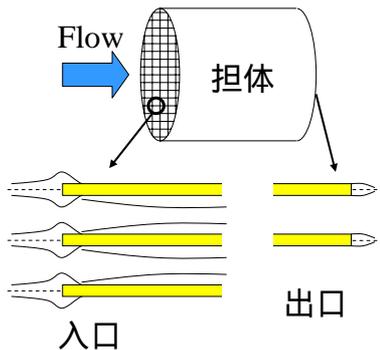
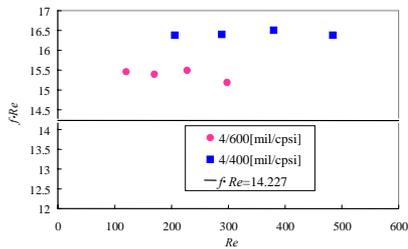
Figure 1-4. $f \cdot Re$ against Re .

理論値14.227よりも実験値は常に大きい.

原因として

担体入口の縮流,担体出口の拡大流れ,閉塞などなどによる損失を考慮する?

担体ごとの $f \cdot Re$ の違い



閉塞効果, 入口縮流効果および出口拡大効果による f の増加量は, 開口率が小さい600[$cpsi$]のほうが, 大きくなると考えられる.

しかし

$f \cdot Re$ の値は $4/400 > 4/600$ である.

その原因として

- 格子断面上の2次流れ
- 格子形状が正確な正方形ではない
- 格子表面が粗い

結論

- 圧力損失は質量流量に比例し, 層流近似は妥当.
- 実験した担体の摩擦係数 f は理論値14.227よりも常に大きい.
- 4/400[mil/cpsi]の摩擦係数 f の方が, 4/600[mil/cpsi]よりも大きい.

第2部: 数値解析

正方形ダクト内流れと流動抵抗 (温度効果を含む)

平田勝哉, 酒井祐二郎, 伯井涼子, 谷川博哉, 舟木治郎

研究目的

本研究での数値解析手法は有限差分法を採用した。(Cheng & Hwang, 1969)



$Pr=0.73$ と固定し, $RaRe=1.0 \times 10^1$ から
 $RaRe=1.0 \times 10^6$ の範囲で, 格子状流路の1格子
の速度場, 温度場を求める.



管摩擦係数 (とレイノルズ数 Re との積
 Re)と,レイリー数 Ra とレイノルズ数 Re
の積 $RaRe$ との関係を求める.

正方形の座標系および境界条件

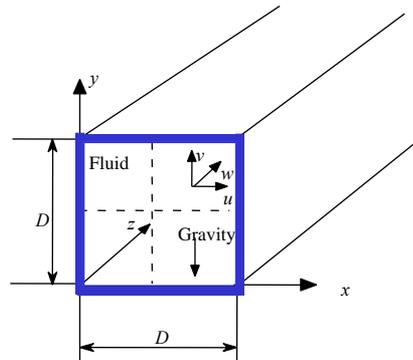


Figure 2-1. Coordinate system for a horizontal square duct.

境界条件は壁面上では次のようになる .

$$\psi = 0, \quad \zeta = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial n^2}, \quad T = 0, \quad w = 0$$

無次元化支配方程式系

$$\nabla \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \Delta u$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \Delta v + RaReT$$

$$\frac{Dw}{Dt} = \Delta w + 32$$

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{1}{Pr} (\Delta T - w)$$

各種無次元量 (*:有次元量)

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{1}{D^*} \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{D^*}{\nu^*} \begin{pmatrix} u^* \\ v^* \end{pmatrix} \quad w = \frac{w^*}{w_m^*}$$

$$t = \frac{t^* \nu^*}{D^*} \quad \frac{\partial p^*}{\partial z^*} = k \quad T = \frac{T^* - T_w^*}{cD^* Pr Ra}$$

$$Re = \frac{D^* w_m^*}{\nu^*} \quad Pr = \frac{\nu^*}{\alpha^*} \quad Ra = \frac{\beta^* g^* c^* D^{*4}}{\nu^* \alpha^*}$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial z^*} = c \quad w_m^* = -\frac{kD^{*2}}{32\mu^*} \quad p = -\frac{p^* D^{*2}}{\rho^* \nu^{*2}}$$

流れ関数-渦度方程式

定義

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad \zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

Poisson方程式

$$\zeta = -\Delta \psi$$

渦度輸送方程式

$$\frac{D\zeta}{Dt} = \nabla^2 \zeta - RaRe \frac{\partial T}{\partial x}$$

ζ : 渦度

ψ : 流れ関数

支配パラメータ

レイリ数

$$Ra = \frac{\beta^* g^* c^* D^{*4}}{\nu^* \alpha^*}$$

レイノルズ数

$$Re = \frac{D^* w_m^*}{\nu^*}$$

プラントル数

$$Pr = \frac{\nu^*}{\alpha^*}$$

管摩擦係数

管摩擦係数は次のように定義される。

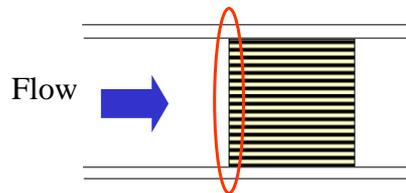
$$k = \frac{\partial p}{\partial z} = \lambda \frac{\rho w_{ave}^2}{2D}$$

管摩擦係数とレイノルズ数の積は次のように導く。

$$\lambda Re = \frac{64}{w_{ave}}$$

数値解析

非圧縮性粘性流体



速度場，温度場ともに十分発達．

Boussinesq近似

壁面温度は一定とし，時間的に変動しない．

軸方向の温度勾配も一定とする．

また格子数は41×41の等間隔で数値解析を行なった．

精度確認 (我々の結果)

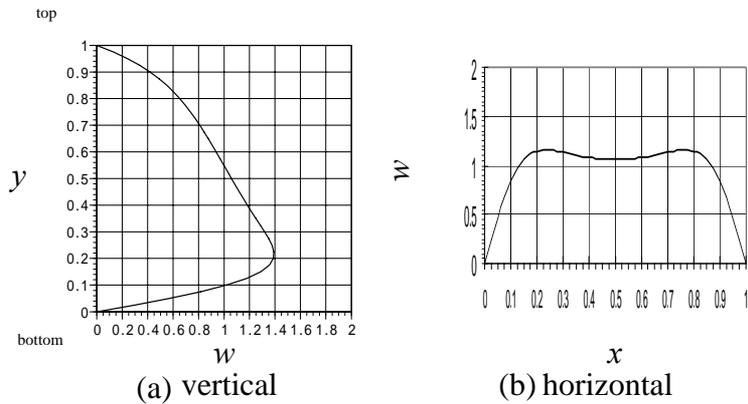


Figure 2-2. Axial velocity distributions along vertical and horizontal central axis at $RaRe = 1.0 \times 10^6$

精度確認 (野村と京免, 2002)

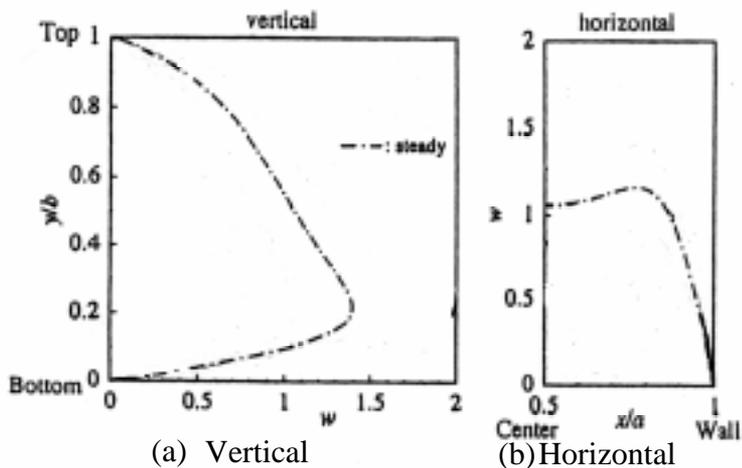
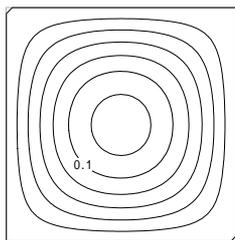
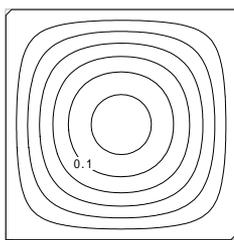


Figure 2-3. Axial velocity distributions along vertical and horizontal central axis at $RaRe = 1.0 \times 10^6$

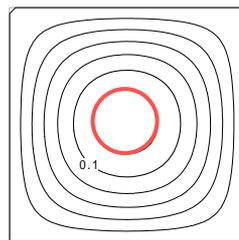
温度分布



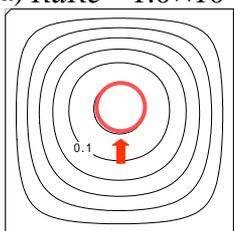
(a) $RaRe = 1.0 \times 10^1$



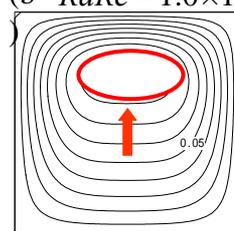
(b) $RaRe = 1.0 \times 10^2$



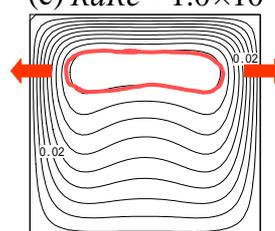
(c) $RaRe = 1.0 \times 10^3$



(d) $RaRe = 1.0 \times 10^4$



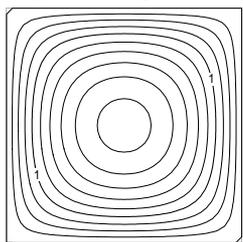
(e) $RaRe = 1.0 \times 10^5$



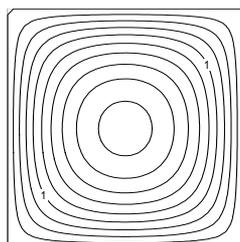
(f) $RaRe = 1.0 \times 10^6$

) Figure 2-4. Isotherms.

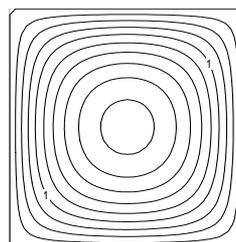
速度分布



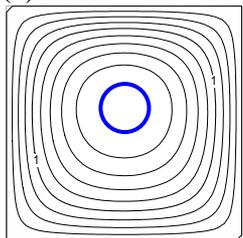
(a) $RaRe = 1.0 \times 10^1$



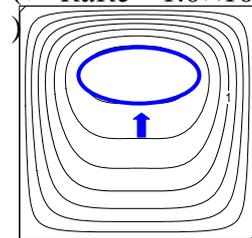
(b) $RaRe = 1.0 \times 10^2$



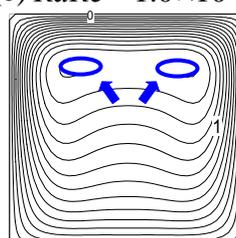
(c) $RaRe = 1.0 \times 10^3$



(d) $RaRe = 1.0 \times 10^4$



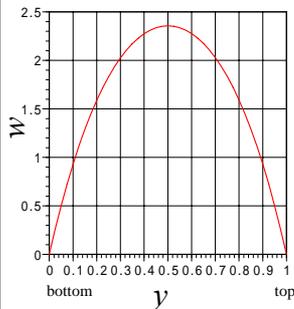
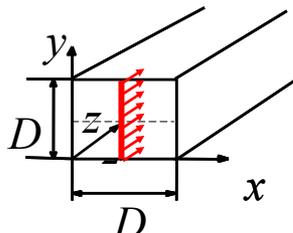
(e) $RaRe = 1.0 \times 10^5$



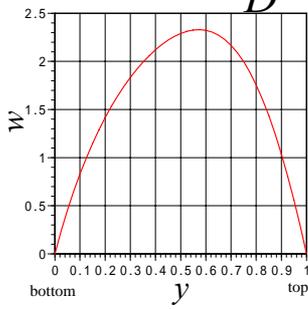
(f) $RaRe = 1.0 \times 10^6$

) Figure 2-5. Iso-velocities of axial velocity.

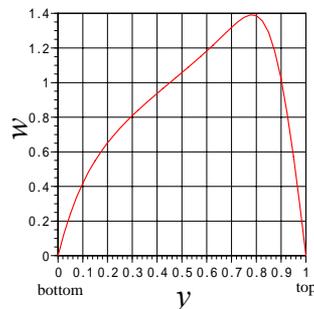
垂直断面速度分布



(a) $RaRe = 1.0 \times 10^2$



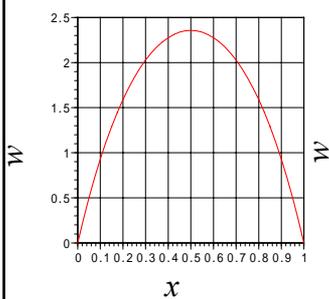
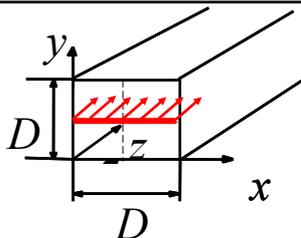
(b) $RaRe = 1.0 \times 10^4$



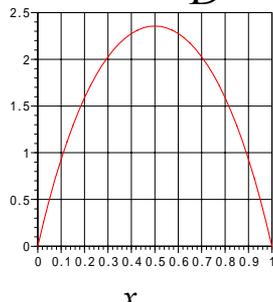
(c) $RaRe = 1.0 \times 10^6$

Figure 2-6. Axial velocity distributions along vertical central axis.

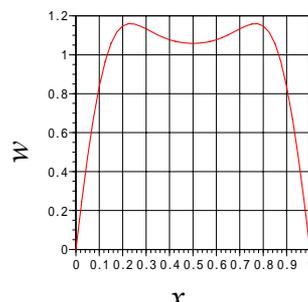
水平断面速度分布



(a) $RaRe = 1.0 \times 10^2$



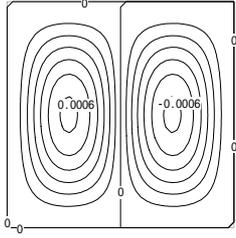
(b) $RaRe = 1.0 \times 10^4$



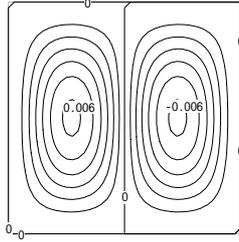
(c) $RaRe = 1.0 \times 10^6$

Figure 2-7. Axial velocity distributions along horizontal central axis.

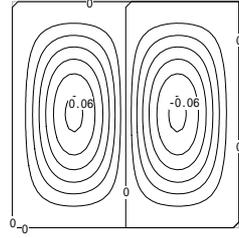
断面内流線



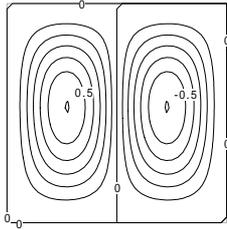
(a) $RaRe = 1.0 \times 10^1$



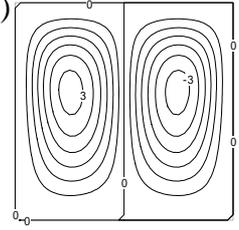
(b) $RaRe = 1.0 \times 10^2$



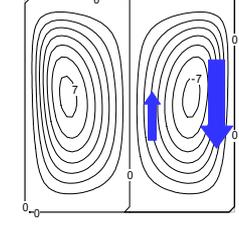
(c) $RaRe = 1.0 \times 10^3$



(d) $RaRe = 1.0 \times 10^4$



(e) $RaRe = 1.0 \times 10^5$



(f) $RaRe = 1.0 \times 10^6$

) Figure 2-8. Streamlines on a cross section.

管摩擦係数

— convection
 — no convection

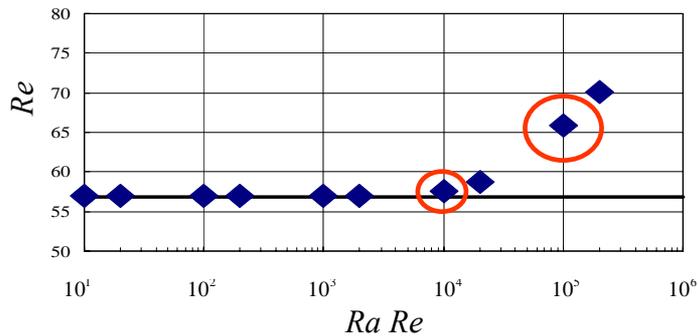


Figure 2-9. Friction factor.

結言

触媒コンバーターの触媒層における格子状流路の1格子を想定して、数値解析を行い、流れの詳細を知ることができた。詳細は以下にまとめた。これらは、概ね、Cheng & Hwang (1969)と一致する。

温度分布について

(1) $RaRe = 1.0 \times 10^1 - 1.0 \times 10^3$ では、最高温度領域は、ほぼダクト中央にある。
 $RaRe = 1.0 \times 10^4$ では、最高温度領域は、 $RaRe$ の増加に伴い上昇する。

速度について

(2) $RaRe = 1.0 \times 10^1 - 1.0 \times 10^3$ では、最大速度領域は、ほぼダクト中央にあり、最大値もほぼ同じである。

$RaRe = 1.0 \times 10^4$ では、最大速度領域は、 $RaRe$ の増加に伴い上昇し、水平方向に2つに分裂する ($RaRe = 1.0 \times 10^6$)。最大速度の値も、急激に低下する。

(3) $RaRe = 1.0 \times 10^4$ では、断面内流速成分の増加が著しく、特に管側壁付近下降流をしめず流線の幅が狭くなるが目立つ。

管摩擦係数 と $RaRe$ との関係について

(4) $RaRe = 1.0 \times 10^1 - 1.0 \times 10^3$ では、管摩擦係数は、無対流時とほぼ同じ値をとる。

$RaRe = 1.0 \times 10^4$ では、 Re は、 $RaRe$ の増加に伴い急激に増加する。例えば、 $RaRe = 1.0 \times 10^5$ では、 Re は15%増加する。

今後の課題

1. 実際使用時の流れ場、温度場、時系列変化などなどのデータの採取。
2. 計測手法、解析手法の開発・改良。
3. 触媒の最適形状、最適条件の提案、明示。