

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

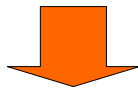
## 背景

---

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.

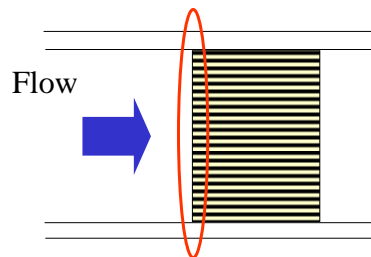


Figure 3. A cell in the innards of a catalytic converter.

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

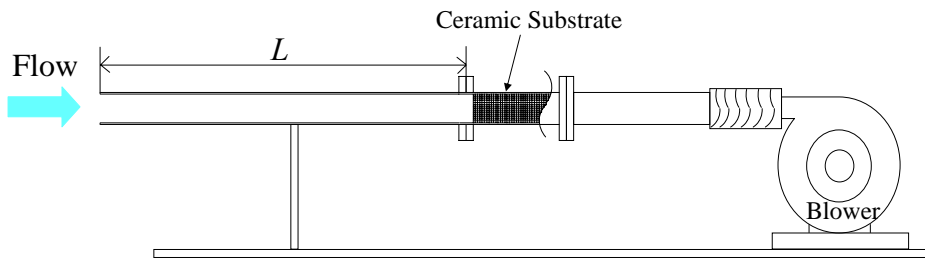


Figure 1-1. Experimental apparatus

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)

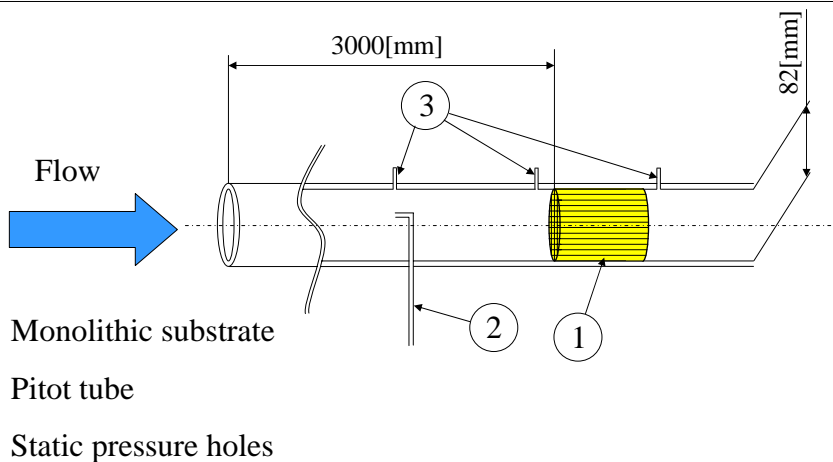


Figure 1-2. Experimental Apparatus (in details).

# 試験担体 (写真)

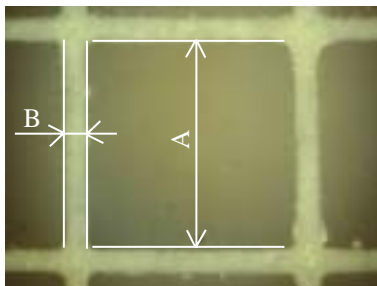


Table 1-1. Principal specifications of tested substrates

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

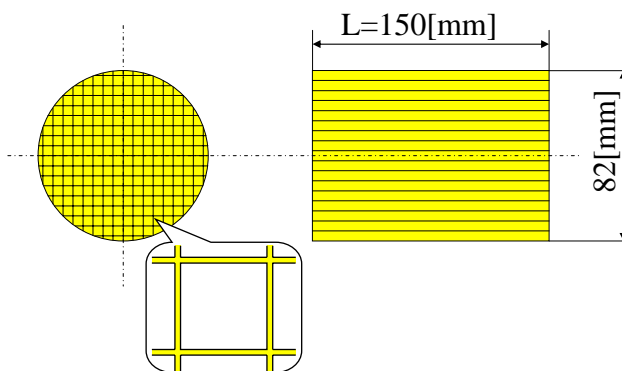


Table 1-2. Parameters of tested substrates

Cell structure [mil/cpsi]	4/400	4/600
Flow-passage wall thickness [mm]	0.102	0.102
Open frontal area $\alpha$ [%]	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]

$\rho$ は流体密度[kg/m<sup>3</sup>]

•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]

$\alpha$ は開口率

$\mu$ は粘度[Pa·s]

$A$ は担体断面積[m<sup>2</sup>]

• $f \cdot Re$ 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

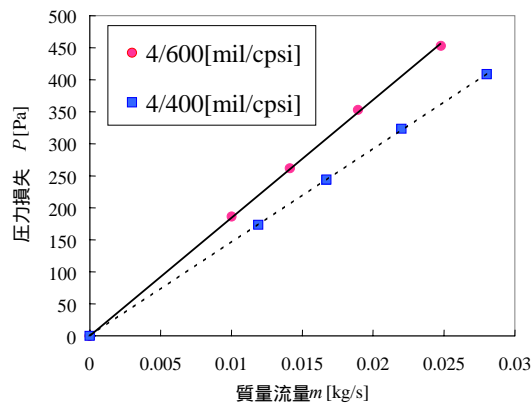


Figure 1-2. Pressure loss against flow rate.

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

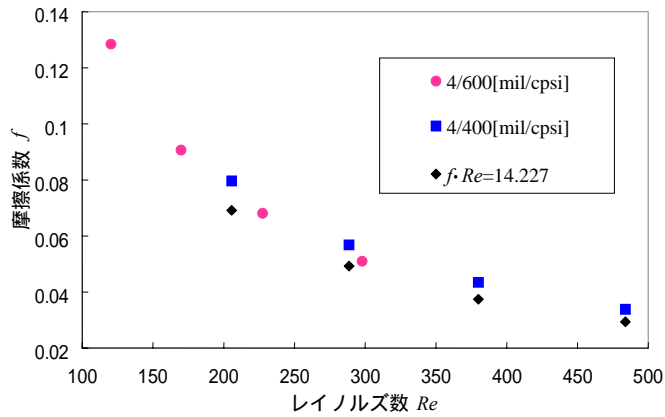


Figure 1-3. Friction factor against Reynolds number.

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

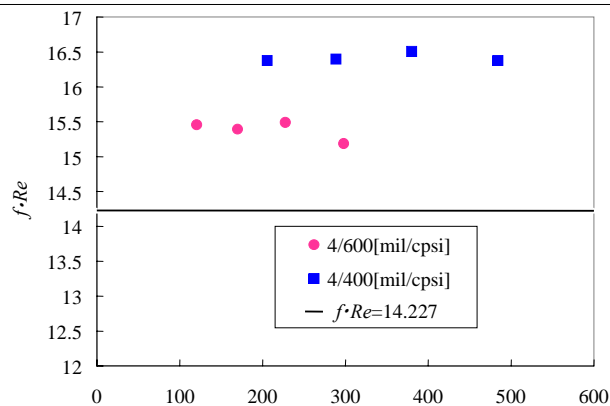


Figure 1-4.  $f \cdot Re$  against  $Re$ .

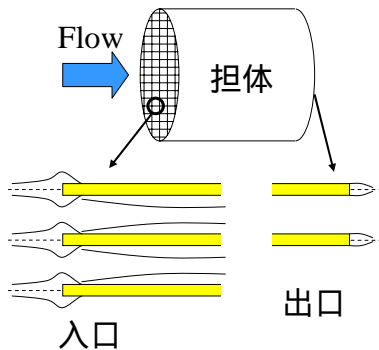
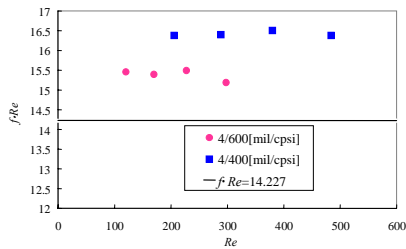
理論値14.227よりも実験値は常にも大きい.

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  $f$  のほうが, 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.

さらに

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

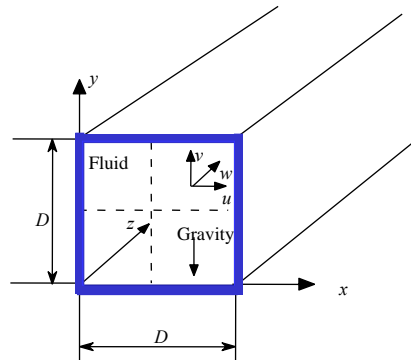


Figure 2-1. Coordinate system for a horizontal square duct.

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)

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{1}{D^*} \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{D^*}{\nu^*} \begin{pmatrix} u^* \\ v^* \end{pmatrix}$$

$$w = \frac{w^*}{w_m^*}$$

$$t = \frac{t^* \nu^*}{D^*}$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial z^*} = k$$

$$T = \frac{T^* - T_w^*}{cD^* Pr Ra}$$

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

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

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

$$\frac{\partial T^*}{\partial z^*} = c$$

$$w_m^* = -\frac{kD^{*2}}{32\mu^*}$$

$$p = -\frac{p^* D^{*2}}{\rho^* \nu^{*2}}$$

## 流れ関数-渦度方程式

定義

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

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

Poisson方程式

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

渦度輸送方程式

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

$\zeta$  : 渦度

$\psi$  : 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．

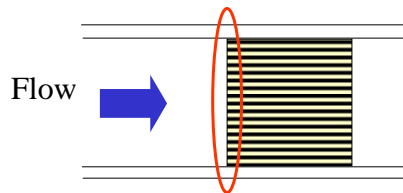
$$k = \frac{\partial p}{\partial z} = \lambda \frac{\rho w_{ave}^2}{2D}$$

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 $41 \times 41$ の等間隔で数値解析を行なった．

## 精度確認 (我々の結果)

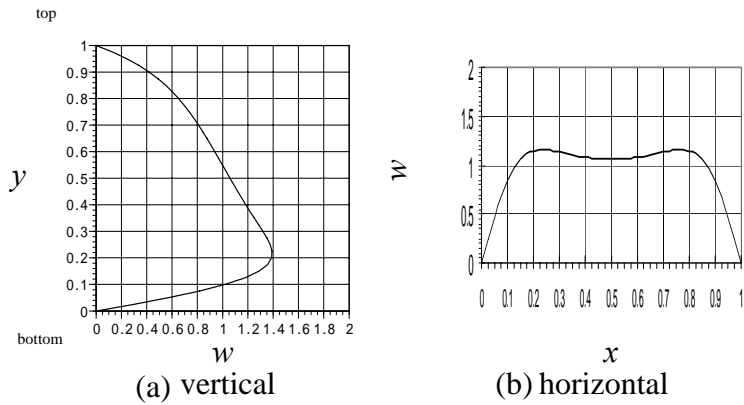


Figure 2-2. Axial velocity distributions along vertical and horizontal central axis at  $RaRe = 1.0 \times 10^6$

## 精度確認 (野村と京免, 2002)

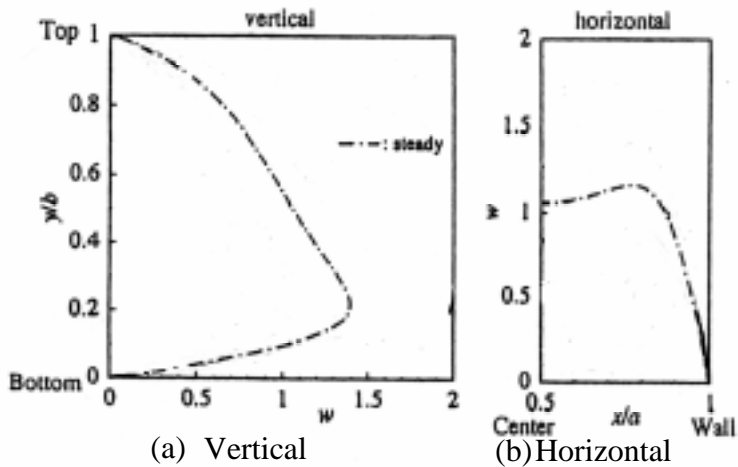
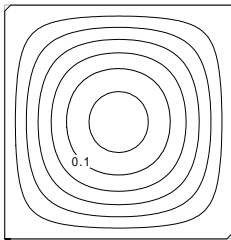
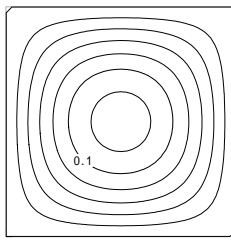


Figure 2-3. Axial velocity distributions along vertical and horizontal central axis at  $RaRe = 1.0 \times 10^6$

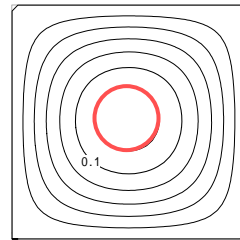
## 温度分布



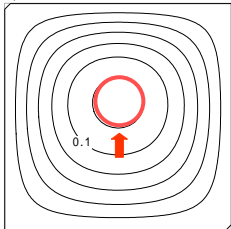
(a)  $RaRe = 1.0 \times 10^1$



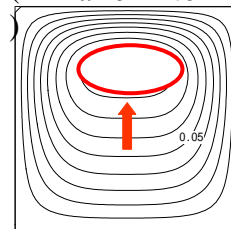
(b)  $RaRe = 1.0 \times 10^2$



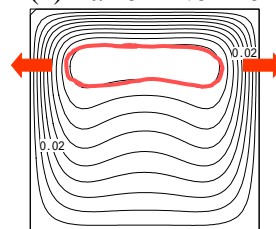
(c)  $RaRe = 1.0 \times 10^3$



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



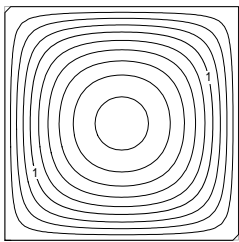
(e)  $RaRe = 1.0 \times 10^5$



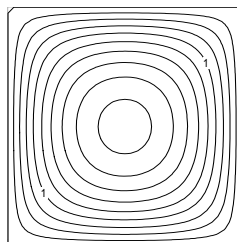
(f)  $RaRe = 1.0 \times 10^6$

) Figure 2-4. Isotherms.

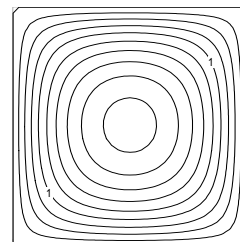
## 速度分布



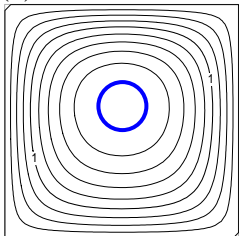
(a)  $RaRe = 1.0 \times 10^1$



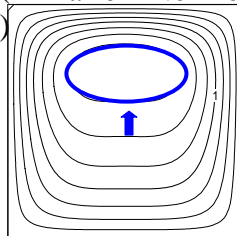
(b)  $RaRe = 1.0 \times 10^2$



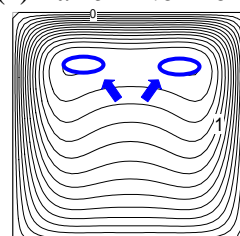
(c)  $RaRe = 1.0 \times 10^3$



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



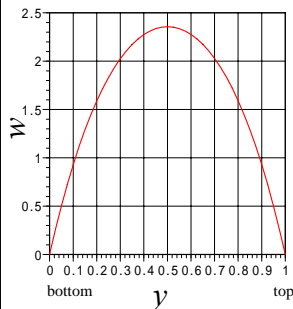
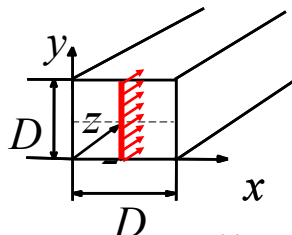
(e)  $RaRe = 1.0 \times 10^5$



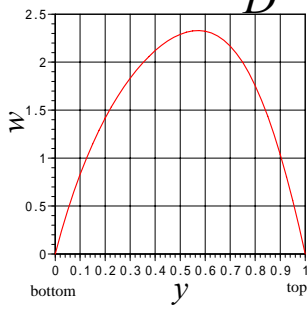
(f)  $RaRe = 1.0 \times 10^6$

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

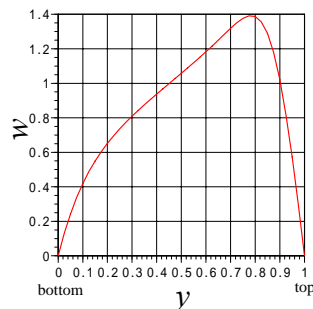
## 垂直断面速度分布



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



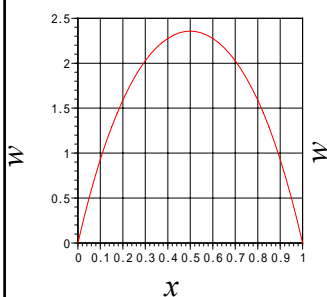
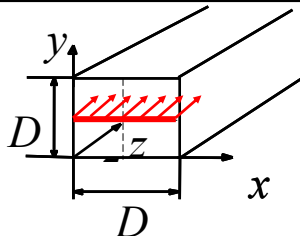
(b)  $RaRe = 1.0 \times 10^4$



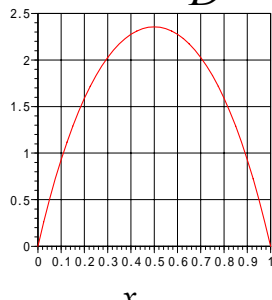
(c)  $RaRe = 1.0 \times 10^6$

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

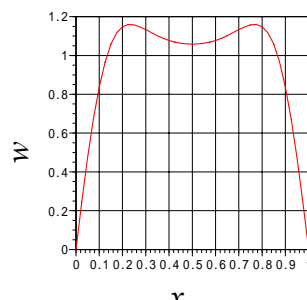
## 水平断面速度分布



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



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

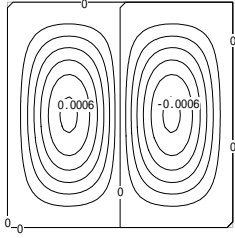


(c)  $RaRe = 1.0 \times 10^6$

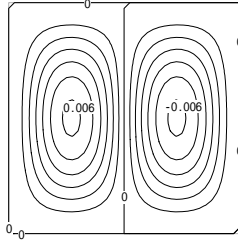
Figure 2-7. Axial velocity distributions along horizontal central axis.



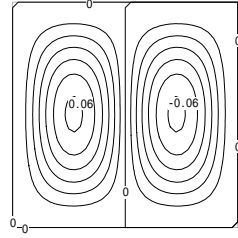
# 断面内流線



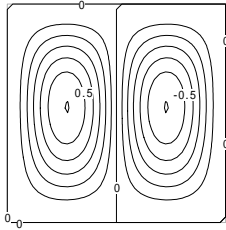
(a)  $RaRe = 1.0 \times 10^1$



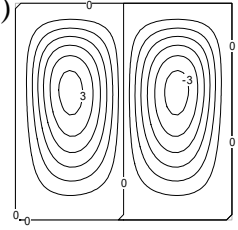
(b)  $RaRe = 1.0 \times 10^2$



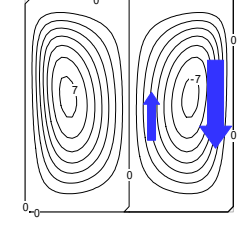
(c)  $RaRe = 1.0 \times 10^3$



(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

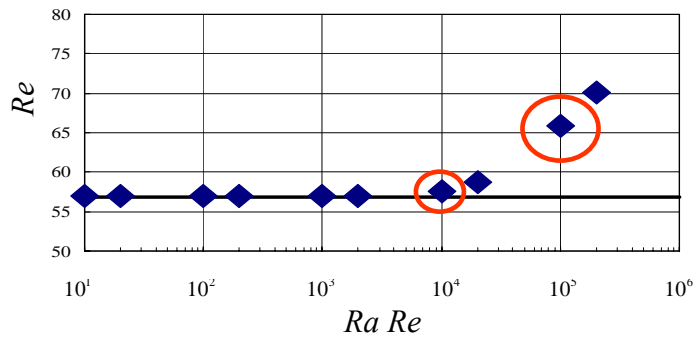


Figure 2-9. Friction factor.

# 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。