

# 矩形管内流におけるナノ粒子堆積に関する数値シミュレーション

## Numerical Analysis on Particle Deposition Phenomena in Rectangular Duct Flow

- 高泉 秀広, 東京理科大学大学院, 125-8585, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, E-mail:4517627@ed.tus.ac.jp
- 山本 誠, 東京理科大学, 125-8585, 東京都葛飾区新宿 6-3-1
- 福留 功二, 東京理科大学, 125-8585, 東京都葛飾区新宿 6-3-1
- 原 潤一郎, カルソニックカンセイ株式会社, 331-0823, 埼玉県さいたま市北区日進町 2-1917
- 岩崎 充, カルソニックカンセイ株式会社, 331-0823, 埼玉県さいたま市北区日進町 2-1917
- 松平 範光, カルソニックカンセイ株式会社, 331-0823, 埼玉県さいたま市北区日進町 2-1917
- Hidehiro Takaizumi, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika, Tokyo, 125-8585, Japan
- Makoto Yamamoto, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika, Tokyo, 125-8585, Japan
- Koji Fukudome, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika, Tokyo, 125-8585, Japan
- Junichiro Hara, Calsonic Kansei Corporation, 2-1917 Nisshin-cho, Kita-ku, Saitama-shi, Saitama 331-8501, Japan
- Mitsuru Iwasaki, Calsonic Kansei Corporation, 2-1917 Nisshin-cho, Kita-ku, Saitama-shi, Saitama 331-8501, Japan
- Norimitsu Matsudaira, Calsonic Kansei Corporation, 2-1917 Nisshin-cho, Kita-ku, Saitama-shi, Saitama 331-8501, Japan
- Author2, Affiliation, Address

In high thermal gradient environment, nano particles often adhere on wall surfaces of fluid machinery due to thermophoresis effects, which results in energy loss. In this study, we performed numerical simulations of a rectangular duct flow with a flat plate to investigate nano-particle motion and its deposition phenomenon. The results show that the thermophoresis dominates nano-particle motion and the deposition layer forms around the flat plate on the low temperature wall of the duct. Due to the adiabatic deposition layer, however, the thermophoresis effect decreases.

### 1. はじめに

近年、流体機器におけるナノ粒子付着現象が工学分野で注目を集めている。流体機器の配管等で生じる粒子付着現象は、エネルギー損失の増大や機械機能の阻害等を引き起こす要因となるため、対策を講じる必要がある。しかし、現状、流体機器内で生じる粒子付着現象のメカニズムは未だに解明されておらず、粒子付着の過程とその制御法について深く理解することが必要である。特に粒子サイズがナノスケール (0.1μm 以下) に到達した場合、粒子は熱泳動の影響を強く受ける。この現象は、流体機器内のナノ粒子付着における粒子輸送の重要な要因である。

熱泳動効果は、加熱平板周りを対象とした実験が 1980 年に Talbot ら<sup>1)</sup>により先駆的に行われた。Talbot らは加熱された平板周辺に微粒子を投入し、微粒子が熱泳動により平板との衝突を避けて流出することを確認した。ナノ粒子付着現象の研究は実験に限らず、数値的な解析も数多く、代表的なものに 2010 年の Abarham ら<sup>2)</sup>による乱流パイプ流れにおける付着現象の研究や、2011 年の Sang-Hee ら<sup>3)</sup>による CFD を用いた垂直平板における粒子付着の数値解析等が挙げられる。しかし、堆積層が熱泳動による粒子付着に与える影響は明らかとされていない。そこで、本研究では 1 枚の平板を設置した矩形管内流におけるナノ粒子付着現象の数値計算を行い、熱泳動によるナノ粒子付着現象により形成された堆積層が流れ場及び粒子付着現象に与える影響を明らかにする。

### 2. 計算手法

#### 2.1. 粒子挙動計算

気体分子運動論より、気体の温度が上昇することで、気体の運動エネルギーは増加する。したがって、高い温度の気体の運動量は、低い温度の気体の運動量よりも大きくなり、気体中の粒子に熱泳

動力が働く。本計算では、ナノ粒子運動について、抗力、重力、熱泳動力を考慮し、それぞれ以下の式に従うものとする<sup>(1-3)</sup>。

$$\frac{\partial \bar{u}_{p,i}}{\partial t} = \bar{F}_{drag} + \bar{F}_{gravity} + \bar{F}_{thermophoresis} \quad (2-1)$$

$$\bar{F}_{drag} = \frac{18\mu_g}{C_c \rho_p d_p^2} \cdot (\bar{u}_g - \bar{u}_p) \quad (2-2)$$

$$\bar{F}_{gravity} = -g \quad (2-3)$$

$$\bar{F}_{thermophoresis} = -\frac{36C_{th}\mu_g\nu_g}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{\nabla T_g}{T_g} \quad (2-4)$$

ここで、以下の表 1-1 に式中の各物理量を示す。

Table. 1-1 Physical quantity

$C_c$ Cunningham factor	$u$ Velocity [m/s]	$\rho$ Density [kg/m <sup>3</sup> ]
$C_{th}$ Thermophoresis coefficient	$\kappa$ Thermal conductivity [W/(m·K)]	
$d$ Diameter [m]	$\mu$ Viscosity [Pa·s]	$g$ : gas
$T$ Temperature [K]	$\nu$ Kinematic viscosity [m <sup>2</sup> /s]	$p$ : particle

#### 2.2. 計算条件

計算に用いた流れ形状は以下の(図 2-1)に示される、矩形管内に平板を設置したものである。この平板の設置角度の変化に対する流れ場の様子を調査する。流れ場やナノ粒子の計算条件を表 2-1 に示す。

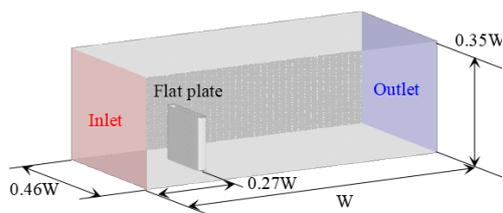


Fig.2-1 Inside rectangular duct.

Table 2-1 Calculation Condition

Gas(Air)	
Reynolds number※	1700
Inflow Velocity [m/s]	30.0
Inflow temperature [°C]	300
Wall surface temperature[°C]	100
Outflow pressure [kPa]	98
Thermal conductivity [W/(mK)]	0.02
Solid (Soot)	
Stokes number※	0.002
Soot concentration[mg/m <sup>3</sup> ]	100
Particle density [g/cm <sup>3</sup> ]	2.26
Deposition layer density [g/cm <sup>3</sup> ]	0.20
Particle diameter [nm]	200
Thermal conductivity [W/(mK)]	0.01

### 2.3. 計算手法

固相のナノ粒子と気相の空気が混合した固気二相流が固体壁面に衝突すると、ナノ粒子の堆積により固体壁面の形状が変化する。また、この形状変化に対応して、流れ場にも変化が生じる。このように、ナノ堆積の時間進行では、気体の流れ、ナノ粒子の流れ、壁面の形状変化が相互に干渉する。したがって、これらの相互作用を考慮する必要がある。

しかしながら、矩形管内流におけるナノ粒子の堆積現象は長時間にわたって生じる現象であると実験からわかっている。また、流れのタイムスケールは短い、壁面形状変化のタイムスケールは長い、両者のタイムスケールは著しく異なる。そこで、粒子堆積のタイムスケールが流れ場の自己調節のタイムスケールに比べて十分大きい、準定常的な流れ場の過程が連続的に発生すると仮定する。すなわち、流れ場に影響を及ぼす程度に壁面形状が変化するまでは、流れ場の定常解を用いて、壁面の粒子堆積量を計算する。これにより、計算コストを大幅に削減することができる。オイラー法は取り扱いが容易で、計算コストの面でも有利であるが、オイラー法による粒子追跡については、粒子の衝突が不明瞭であり、また、計算が不安定であるという点があるため本研究では採用しない。一方、ラグランジュ法は個々の粒子の衝突状況を知ることができる。このため、本研究ではオイラー・ラグランジュ・カップリングの手法を用いる。粒子の流入位置はランダムとし、粒子間衝突は考慮しない。また、壁面に粒子が衝突した場合は必ず付着するものとして扱う。流体と堆積層との間に生じる相互作用を調査するため、堆積層の形状を流れ場にフィードバックするマルチショット法を用いた。計算手順は以下の通りである。(1)計算格子を生成、(2)定常の流れ場を計算、(3)粒子軌道を計算、(4)堆積層形状を計算、(5)得られた堆積層形状を境界条件として(2)-(4)を繰り返し実行する。ここで、堆積層に覆われた壁面には滑りなし・断熱条件を課す。

## 3. 計算結果

### 3.1. 流れ場

粒子投入前の流れ場について述べる。図 3-1 に局所の速度の大きさをカラーコンターを付けた流線を示す。平板後方において大

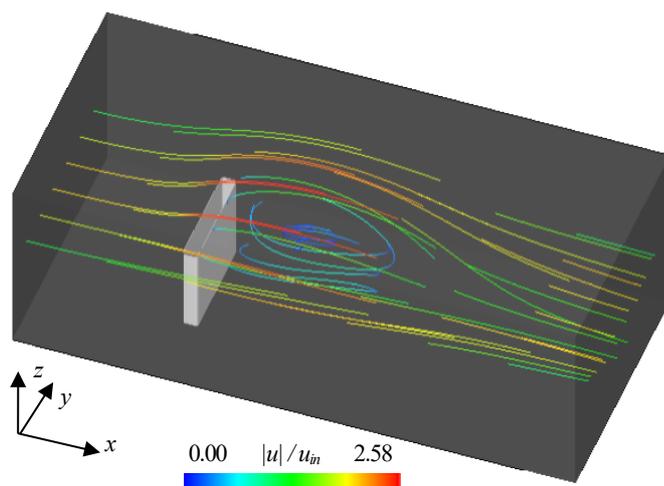


Fig. 3-1 Streamline in the duct flow without particle deposition. The streamline is colored by the local velocity magnitude  $|u|$  normalized by inlet velocity  $u_{in}$ .

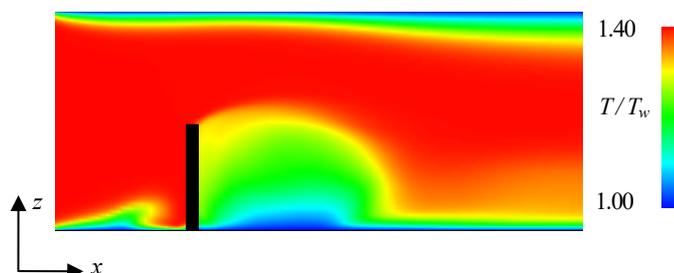


Fig. 3-2 Distribution of static temperature  $T$  at channel center ( $y/W = 0.3, t = 0$  [sec.]) without particle deposition. The temperature is normalized by wall temperature  $T_w$ .

きな剥離渦を構成する 3 次元構造が確認できる。図 3-2 に  $y/W = 0.3$  における冷却壁面温度により無次元化された  $x-z$  平面の静温分布を示す。平板後方に生じた渦により矩形管の壁面近傍における熱伝達が促進され、矩形管上面と比較すると矩形管底面近傍の低温領域が広がることがわかる。

### 3.2. ナノ粒子付着現象

次にナノ粒子付着現象について述べる。粒子投入開始時を  $t = 0$  [sec.] と定義し、図 3-3 に矩形管底面における堆積層厚さの分布を示す。図 3-3(a) から  $t = 30$  [sec.] における堆積層が平板の前方および側面に観察される。時間経過するにつれて堆積層の範囲は広がっている様子がわかる(図 3-3(b))。また、平板より生じる横渦により、ナノ粒子の大部分は矩形管底面に巻き込む形で輸送され付着することがわかった。

次に、ナノ粒子に作用する熱泳動効果の変化について調査するため、ナノ粒子堆積前後の温度場を比較する。図 3-4 にナノ粒子が堆積した  $t = 290$  [sec.] での  $y/W = 0.3$  における静温分布を示す。図 3-2 と比べると、堆積後の温度場では平板後方の低温領域が狭くなっている。これはナノ粒子が堆積することにより矩形管底面の熱通過率が低下したことを示唆する。粒子に働く熱泳動力は温度勾配に比例し、ナノ粒子の高温領域から低温領域への輸送に寄与する。ナノ粒子の堆積は平板から生じる横渦により流体に追従しながら壁面まで粒子が輸送され、流体と壁面の温度勾配が大きくなる壁面付近まで輸送された際に熱泳動力が強く作用し、付着していることがわかった。また、長時間経過した場合には、断熱

効果を持つナノ粒子堆積層に覆われた壁面近傍には熱泳動による付着がタイムステップ初期と比較して現象していることがわかった。このことから熱泳動効果により壁面にナノ粒子が付着し、堆積層が熱泳動効果を低減させる相互作用を持つことが確認できた。

(2011),1-10.

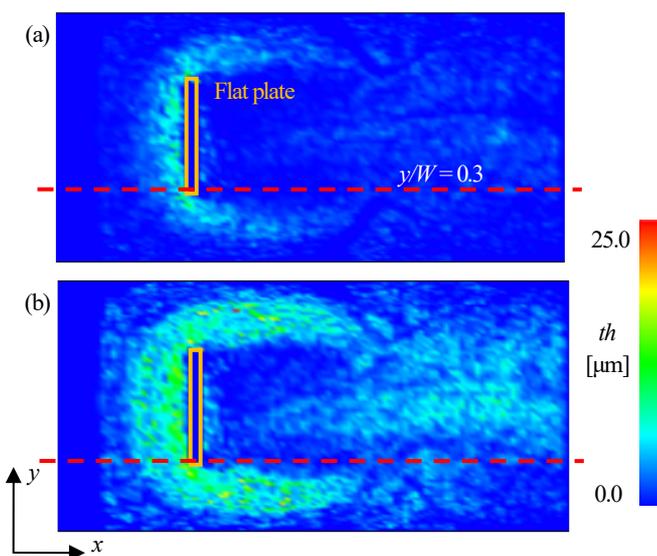


Fig. 3-3 Distribution of deposition thickness,  $th$ , on the bottom wall of the rectangular duct (top view); (a)  $t = 30$  [sec.], (b)  $t = 100$  [sec.].

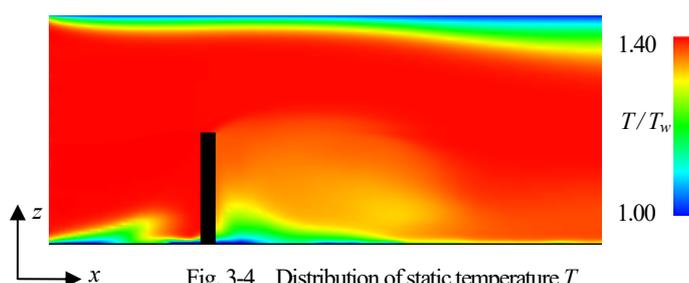


Fig. 3-4 Distribution of static temperature  $T$  ( $y/W = 0.3$ ,  $t = 290$  [sec.]). The temperature is normalized by wall temperature  $T_w$ .

#### 4. おわりに

本研究では、矩形管内部要素を再現し、平板を設置した矩形管内流における粒子堆積現象の数値解析を行い、内部流に混入する粒子の堆積特性を数値的に観測した。また、堆積減少が内部流に与える影響を調査し、熱泳動による影響、粒子に作用する力のパラメータ等を数値的に検討した。粒子の付着は熱泳動効果が影響し、衝突直前は抗力に等しい  $10^2 \text{m/s}^2$  規模の熱泳動力が作用した。熱泳動力の大きさは温度勾配に比例するため、粒子は流れに追従し、平板の後方に生じた渦領域により壁面付近まで輸送され、温度勾配の大きい壁面近傍まで輸送された際に熱泳動付着を引き起こす事がわかった。

#### 5. 参考文献

- (1) Talbot, L. et al., Thermophoresis of particles in a heated boundary layer, *J. Fluid Mech.*, **101** (1980), 737-758.
- (2) Abarham, M. et al., An analytical study of thermophoretic particulate deposition in turbulent pipe flows, *Aerosol Sci. Technol.*, **44** (2010), 785-795.
- (3) Sang-Hee, W. et al., Statistical lagrangian particle tracking approach to investigate the effect of thermophoresis on particle deposition onto a face-up flat surface in a parallel airflow, *J. Aerosol Sci.*, **44**