

RAFAL-AKN 解析例 (4)

二次元スリットを過ぎる熱遷移流の流量

● 計算内容

上下壁面に線形温度分布を持つ、幅 $H = 0.5\mu\text{m}$ 、長さ $L = 4\mu\text{m}$ の二次元スリットを過ぎる熱遷移流を圧力レベルを変えて解析し、質量流量 Q と圧力 p の関係を文献 [1] の結果と比較する。

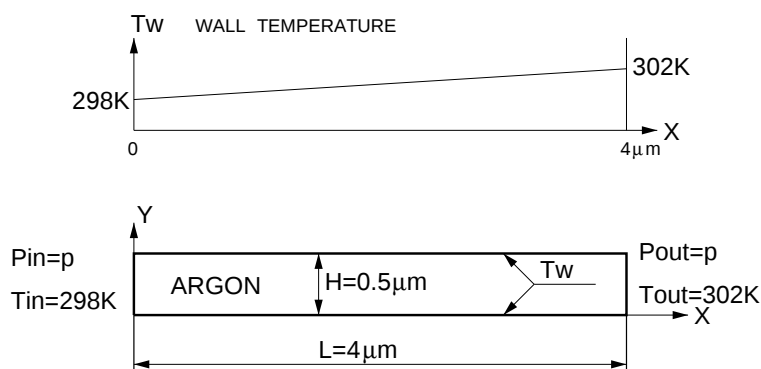


図1 二次元スリットを過ぎる熱遷移流

初期条件およびスリット両端の圧力 p を表1のように設定する。表中のクヌーセン数 K_n は、圧力 p 、温度 $T_0 = (T_{in} + T_{out})/2 = 300\text{K}$ における平均自由行程 $\lambda = kT_0/(\sqrt{2}\sigma_T p)$ (k はボルツマン定数 $1.380658 \times 10^{-23}\text{J/K}$ 、 σ_T は気体をアルゴンとして全衝突断面積 $4.1455 \times 10^{-19}\text{m}^2$) とスリット幅 H で定義される $K_n = \lambda/H$ の値である。

p (Pa)	K_n	p (Pa)	K_n
1.41301×10^6	0.01	4.46833×10^3	3.16228
4.46833×10^5	0.0316228	1.41301×10^3	10
1.41301×10^5	0.1	4.46833×10^2	31.6228
4.46833×10^4	0.316228	1.41301×10^2	100
1.41301×10^4	1		

表1 設定圧力とクヌーセン数

● 計算条件

解析領域のセル分割

図1の解析領域を長手方向80分割、幅方向11分割する(880セル)。

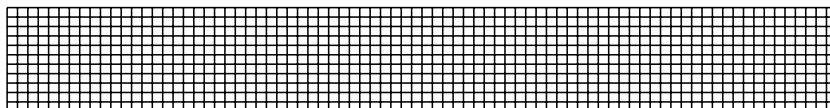


図 2 解析領域セル分割図

境界条件

・スリット壁面

拡散反射境界とする。

壁面温度は、スリット左端で 298K, スリット右端で 302K の線形分布を、スリット長手方向のセル分割数 (80) の階段関数で近似する。

・スリット入口

圧力 $p_{in} = p$ (p の具体値は表 1 参照), 温度 $T_{in} = 298\text{K}$ のマクロ流入速度を自動設定する流入境界 (文献 [2] 参照)。

・スリット出口

圧力 $p_{out} = p$ (p の具体値は表 1 参照), 温度 $T_{out} = 302\text{K}$ のマクロ流入速度を自動設定する流入境界 (文献 [2] 参照)。

気体条件

気体種 = アルゴン (単位質量当り気体定数 $R = 208.1333\text{J}/(\text{kgK})$ 、分子を剛体球とみなしたときの全衝突断面積 $\sigma_T = 4.1455 \times 10^{-19}\text{m}^2$)

速度空間

DVM(discrete velocity method) では、分子速度の空間を有限個の点に離散化して各点における速度分布関数の値を求め、その分布関数から数値積分によりマクロ量を算出する。ここでは、分子速度の 2 次元空間を $[-2000\text{m}, 2000\text{m}] \times [-2000\text{m}, 2000\text{m}]$ として、これを 50×50 等分した。数値積分法は台形公式を用いた。

● 計算手順

手順 I

スリット両端の境界を、通常の流入境界 (流入速度ゼロの流入境界) として $7.5 \times 10^{-7}\text{s}$ 計算して定常状態を達成する。

手順 II

スリット両端の流入境界の流入速度を、 $7.49 \times 10^{-8}\text{s}$ 間隔で、流入境界に隣接するセルの x 方向流速に設定して (マクロ流入速度を自動設定する流入境界 [2]) $7.5 \times 10^{-7}\text{s}$ 計算する。これにより、流入境界の流入速度は 10 回更新されることになる。

● 結果

スリット中央におけるセルの密度と x 方向流速から質量流量 $Q(\text{kg}/(\text{sm}))$ を数値積分により算出する。この質量流量 Q を

$$Q_{NDM} = \frac{Q}{\{pH^2/(T_0\sqrt{2RT_0})\}(dT/dx)}$$

と無次元化する。ここで、温度勾配 dT/dx は、スリット入口出口からそれぞれ $1\mu\text{m}$ を除いた残りの $2\mu\text{m}$ 部分の、スリット幅中央における x 方向温度分布に最小自乗法で適合した直線の勾配を用いた (この温度勾配は壁面温度勾配より若干小さい値となる)。この無次元流量 Q_{NDM} とクヌーセン数 K_n の関係を図 3 に示す。図中実線は文献 [1] の結果である。

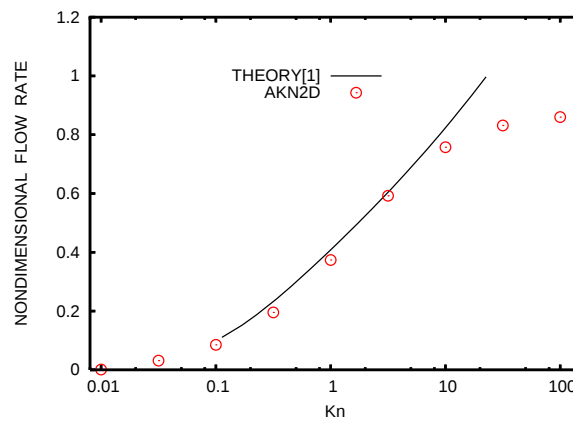


図 3 二次元スリットを通過する熱遷移流の無次元流量とクヌーセン数の関係

● 検討

文献 [1] と RAFAL-AKN のボルツマン方程式衝突項のモデル化の相違 (剛体球分子の線形化モデルと BGK モデルの相違) や計算条件の相違にもかかわらず $K_n \leq 10$ における両者の一致はよい。衝突項の影響が小さくなる $K_n > 10$ において一致が悪化するのは、RAFAL-AKN の境界条件が文献 [1] の計算条件と整合しなくなるのが原因と思われる。

● 文献

[1] Ohwada, T., Sone, Y. and Aoki, K. : Numerical analysis of the Poiseuille and thermal transpiration flows between two parallel plates on the basis of the Boltzmann equation for hard-sphere molecules , Physics of Fluids A Vol.1, No.12(1989), pp.2042-2049.

[2] 池川正人, 小林淳一 : 直接シミュレーションモンテカルロ法による希薄流シミュレータの開発 , 日本機械学会論文集 (B 編) 54 巻 507 号 (1988), pp.3057-3060.