

RAFAL - 3D 解析例 (7)

壁面に垂直に衝突する噴流の解析

● 計算内容

内径 1mm, 長さ 7mm の円筒ノズルから完全真空中に噴出するキセノンガス噴流が、ノズル中心軸に垂直にノズル出口面から距離 G を介して配置された壁面に衝突する希薄気体流を解析する。ノズル出口面と壁面の距離 G を変化させて流れに対する影響を調べる (図 1 および表 1 参照)。

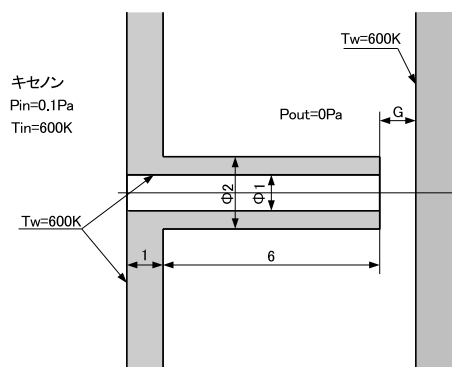


図 1 壁面に垂直に衝突する噴流

	G
ケース 1	0.2mm
ケース 2	0.4mm
ケース 3	0.6mm
ケース 4	0.8mm
ケース 5	1mm

表 1 計算ケース

ノズル上流のキセノンガスの圧力 p_{in} は $p_{in} = 0.1\text{Pa}$ 、温度 T_{in} は $T_{in} = 600\text{K}$ 、固体壁面温度 T_W は全て $T_W = 600\text{K}$ とする。

● キセノンガスの物性値

DSMC 解析に必要な物性値データを以下のように算定する。

1mol の質量 $M = 0.13129$ (kg/mol)

分子 1 個の質量 $m = 2.180123 \times 10^{-25}$ (kg)

単位質量当り気体定数 $R = 63.3293$ (J/kg·K)

剛体球分子モデルの全衝突断面積 $\sigma_T = 7.9541 \times 10^{-19}$ (m²)

剛体球分子モデルの全衝突断面積 σ_T は、Chapman-Enskog の方法による

$$\sigma_T = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{mkT}{\pi}}$$

から求めた。ここで、 k はボルツマン定数 $k = 1.380658 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$ (CODATA 1986 年調整値)、 μ は温度 T における粘性係数である。

キセノンガスの温度 $T = 273.15 \text{K}$ における粘性係数 $\mu = 21.07 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s}$ (Chapman, S., Cowling, T.G. (1953) The mathematical theory of non-uniform gases (2nd ed) Cambridge University Press; p.229) を代入すれば

$$\sigma_T = \frac{1}{21.07 \times 10^{-6}} \sqrt{\frac{2.180123 \times 10^{-25} \times 1.380658 \times 10^{-23} \times 273.15}{\pi}} = 7.6779 \times 10^{-19} \text{ (m}^2\text{)}$$

を得る。分子直径 d は $d = \sqrt{\sigma_T/\pi} = 4.94 \times 10^{-10} \text{m}$ となる。

● DSMC 計算に必要なパラメータの計算

(1) 平均自由行程 λ

剛体球分子の平均自由行程 λ は

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\sigma_T p}$$

より求められる。圧力 p , 温度 T にノズル上流のキセノンガス圧力 p_{in} , 温度 T_{in} を代入して

$$\lambda = \frac{1.380658 \times 10^{-23} \times 600}{\sqrt{2} \times 7.6779 \times 10^{-19} \times 0.1} = 7.629216 \times 10^{-2} \text{ (m)}$$

となる。

ノズル直径 $D = 1 \times 10^{-3} \text{m}$ を代表長とするクヌーセン数 $K_n = \lambda/D$ は、 $K_n = 7.629216 \times 10^{-2}/1 \times 10^{-3} = 76.3$ となり、流れは自由分子流となる。

(2) 平均自由時間 τ

平均自由時間 τ は、

$$\tau = \frac{\lambda}{\bar{c}}$$

で定義される。ここで \bar{c} は、ノズル上流のキセノンガス分子の平均速度で

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8RT_{in}}{\pi}} = \sqrt{\frac{8 \times 63.3293 \times 600}{\pi}} = 311.0628 \quad (\text{m/s})$$

である。以上より平均自由時間 τ は、

$$\tau = \frac{7.629216 \times 10^{-2}}{311.0628} = 2.452628 \times 10^{-4} \quad (\text{s})$$

となる。

• DSMC 法シミュレーションモデル

円筒ノズル内部とノズル上下流近傍の流れを軸対称問題として解析する。

解析領域

図 2 に示す領域を解析領域とする。

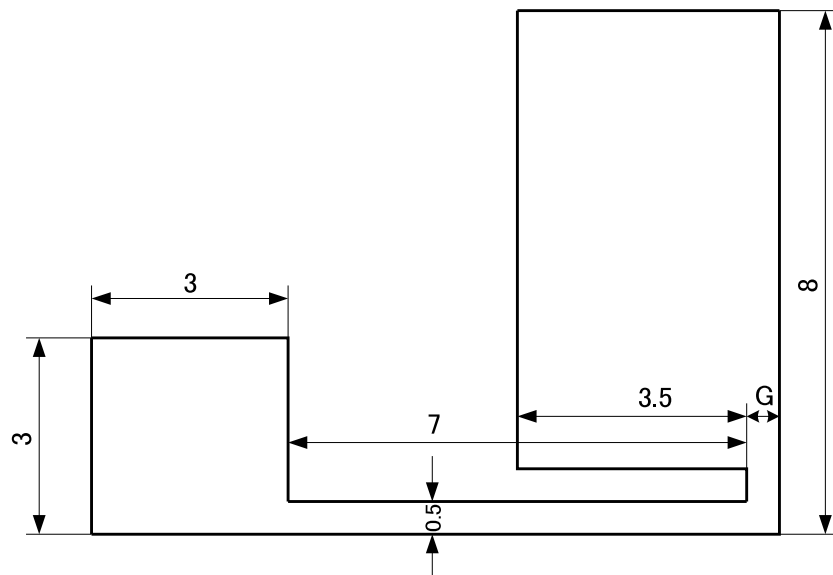
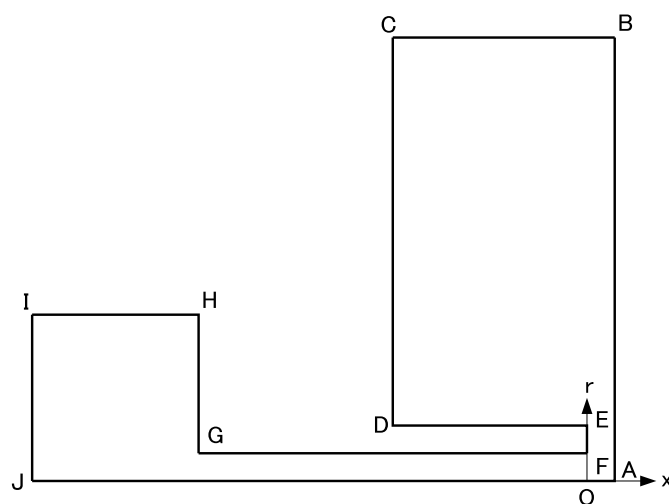


図 2 解析領域

解析領域のセル分割

ノズル出口面の開口円中心を原点 O 、中心軸方向に x 軸、中心軸と垂直方向に r 軸をとった座標系を設定してセル分割する。全解析領域を $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ の 4 辺形セルで分割する。



座標系の設定

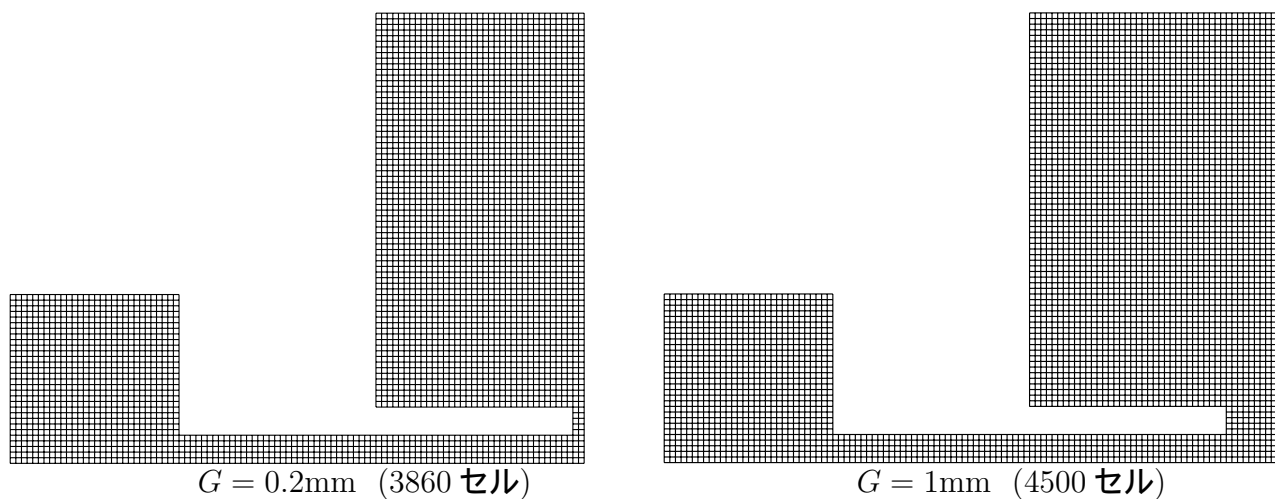


図3 解析領域のセル分割図 (ケース1, ケース5)

境界条件

(i)AB 境界

壁面温度 $T_W = 600\text{K}$ の拡散反射固体壁境界。

(ii)BCD 境界

流入気体圧力 0 の流入境界 (実質的な流出境界)。

(iii)DEFGH 境界

壁面温度 $T_W = 600\text{K}$ の拡散反射固体壁境界。

(iv)HIJ 境界

圧力 $p_{in} = 0.1\text{Pa}$, 温度 $T_{in} = 600\text{K}$ のキセノンガス流入境界。マクロ流入速度はゼロとする。

(v)JOA 境界

透過境界。

時間ステップ幅 Δt

セル寸法 0.0001m を分子平均速度 $\bar{c} = 311.0628\text{m/s}$ で進む時間 $0.0001/311.0628 = 3.214784 \times 10^{-7}\text{s}$ を参考にして $\Delta t = 3 \times 10^{-7}\text{s}$ とする。この Δt は平均自由時間の 1/816 程度の時間である。

解析手順

以下の手順でシミュレーションする。

- (1) 解析領域内に分子を導入し、定常状態を達成させる。
- (2) 定常状態達成後、マクロ量時間平均のシミュレーションをする。

● 結果

(1) 解析領域の分子数密度分布を図 4 に示す。

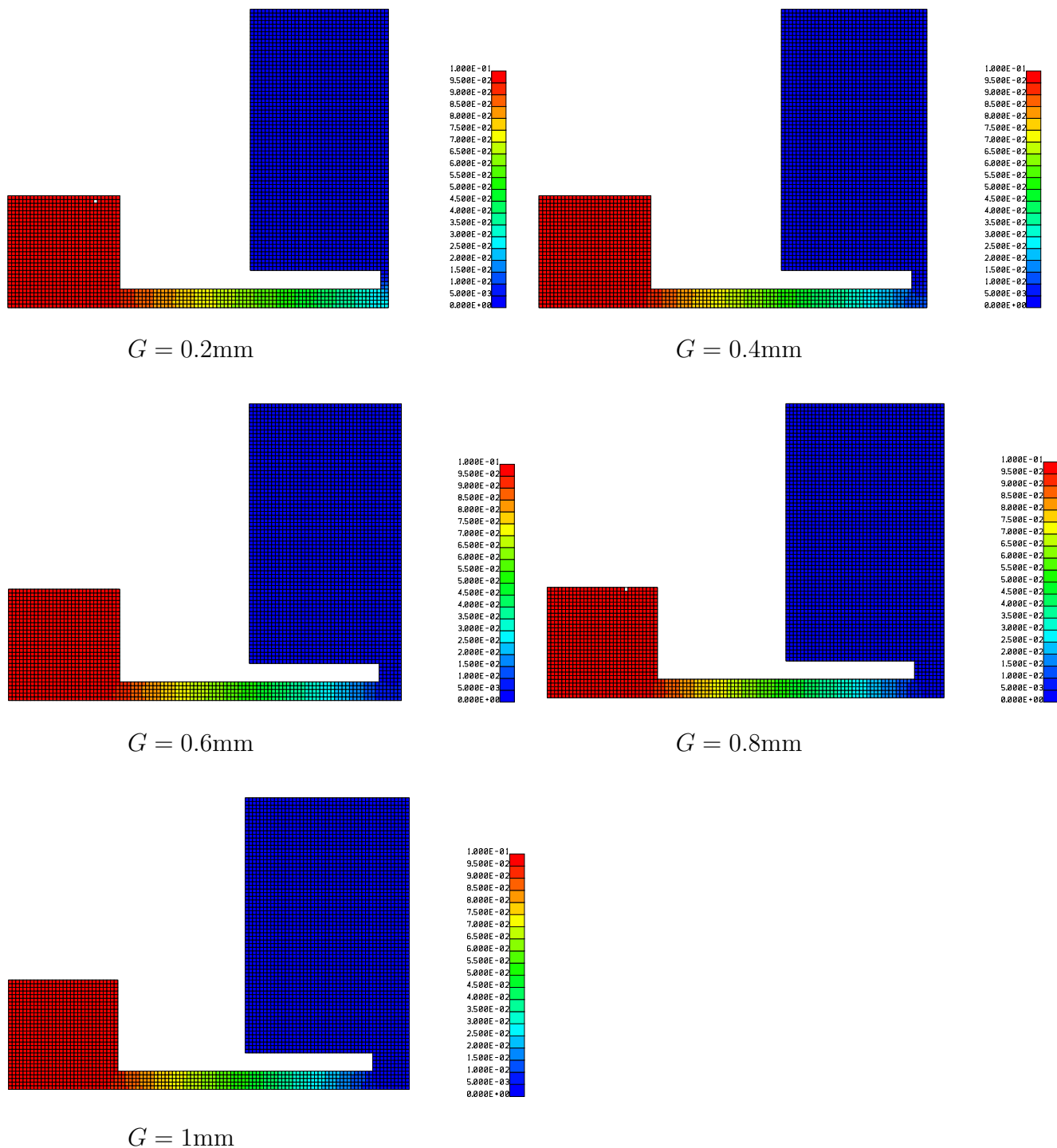


図 4 分子数密度分布 (1/m³)

(2) 解析領域の温度分布を図 5 に示す。

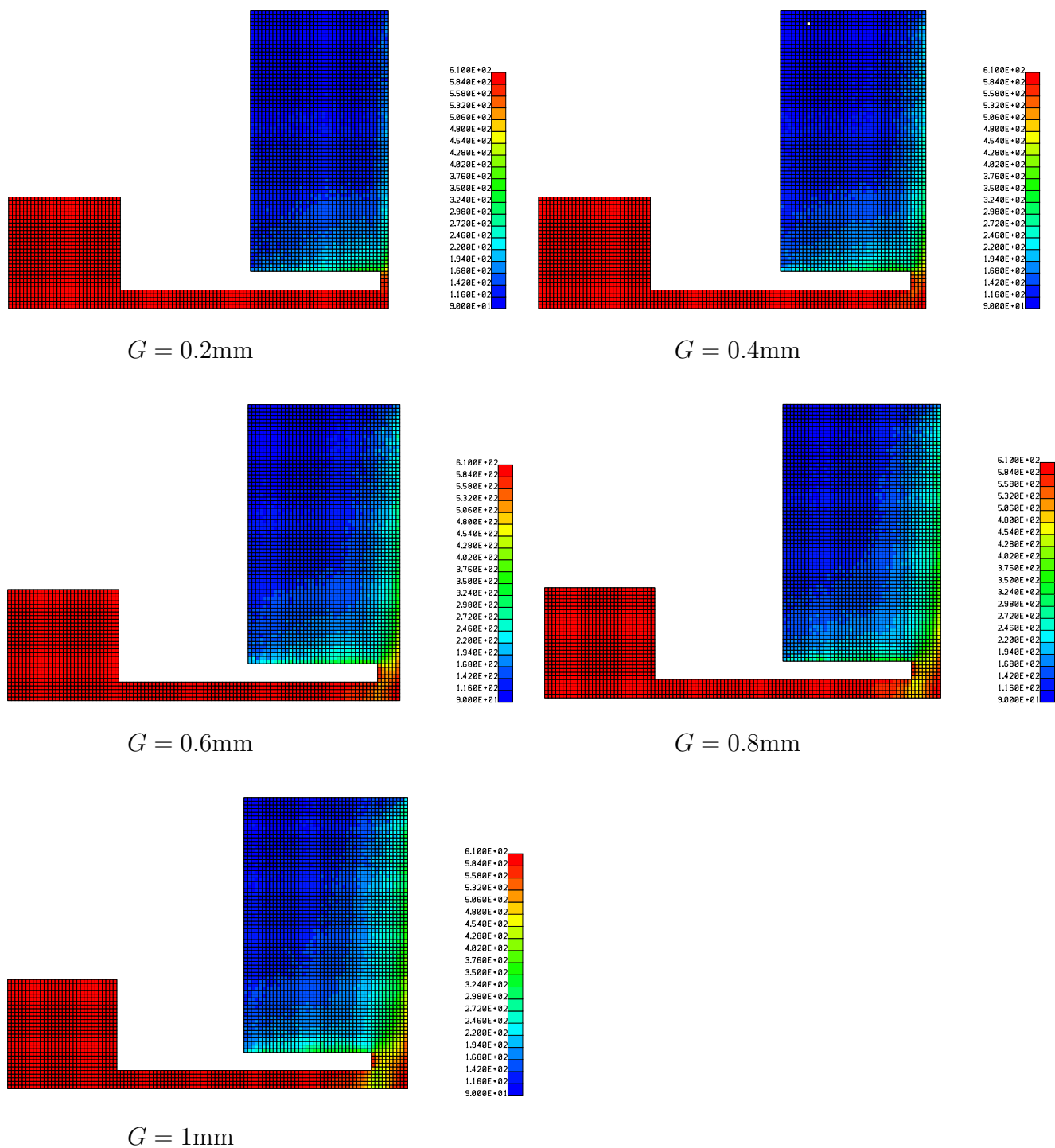


図 5 温度分布 (K)

(3) 解析領域の圧力分布を図 6 に示す。

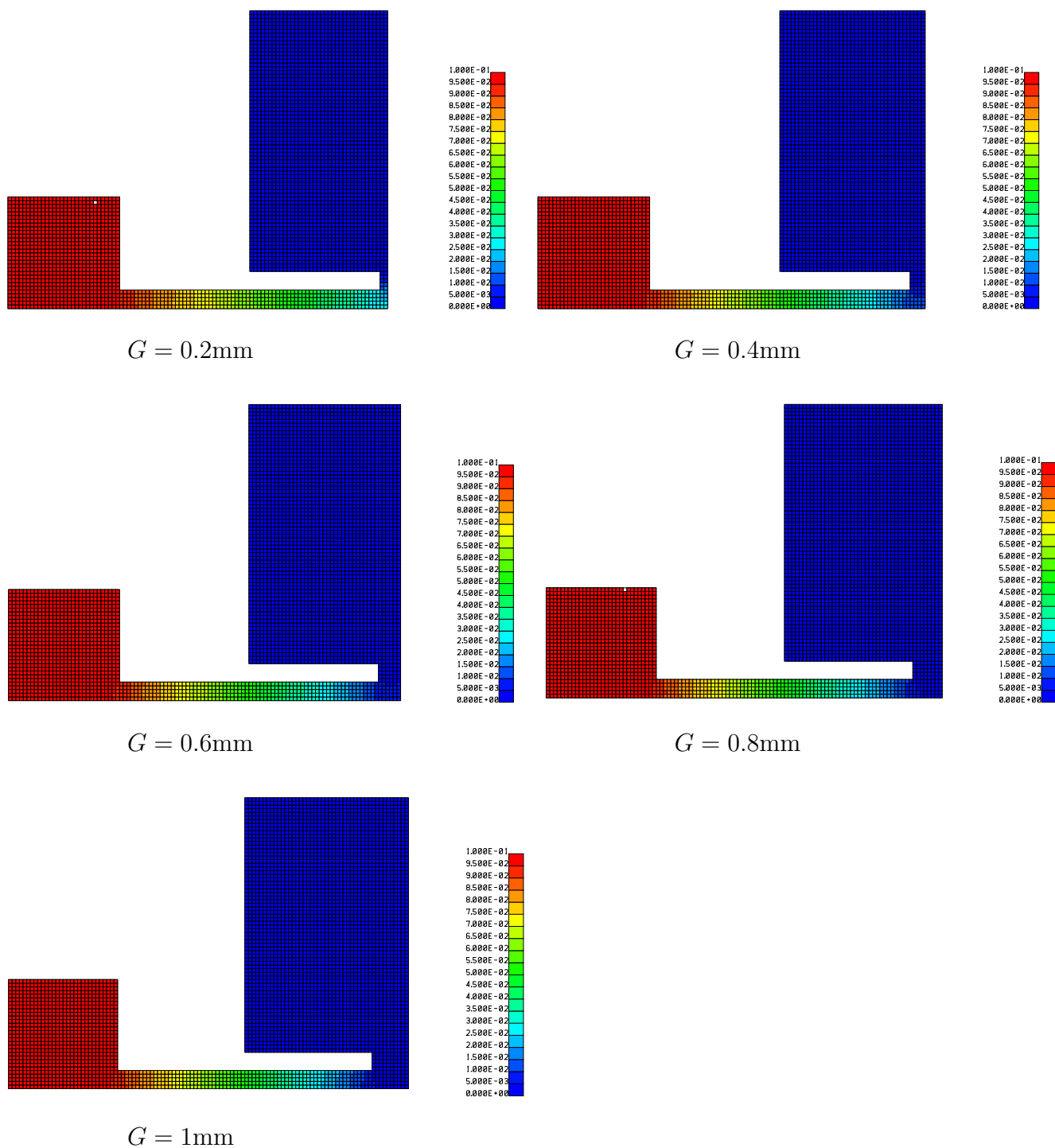


図 6 圧力分布 (Pa)

(4) 噴流が衝突する固体壁面上の径方向 (r 方向) の分子数密度, 温度, 圧力の分布を図 7,8,9 に示す。

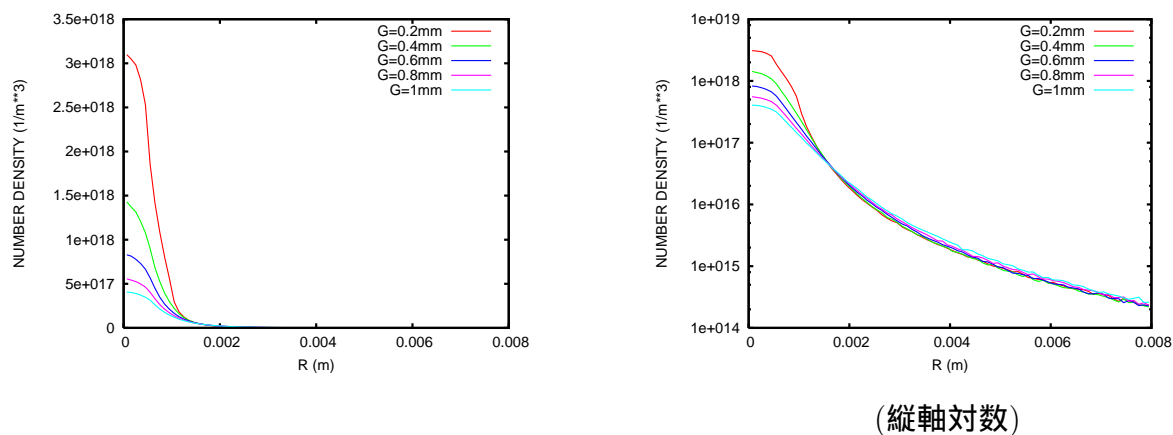


図 7 噴流が衝突する固体壁面上の径方向 (r 方向) 分子数密度分布

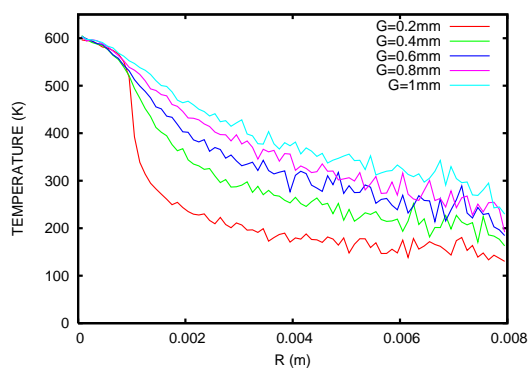


図 8 噴流が衝突する固体壁面上の径方向 (r 方向) 温度分布

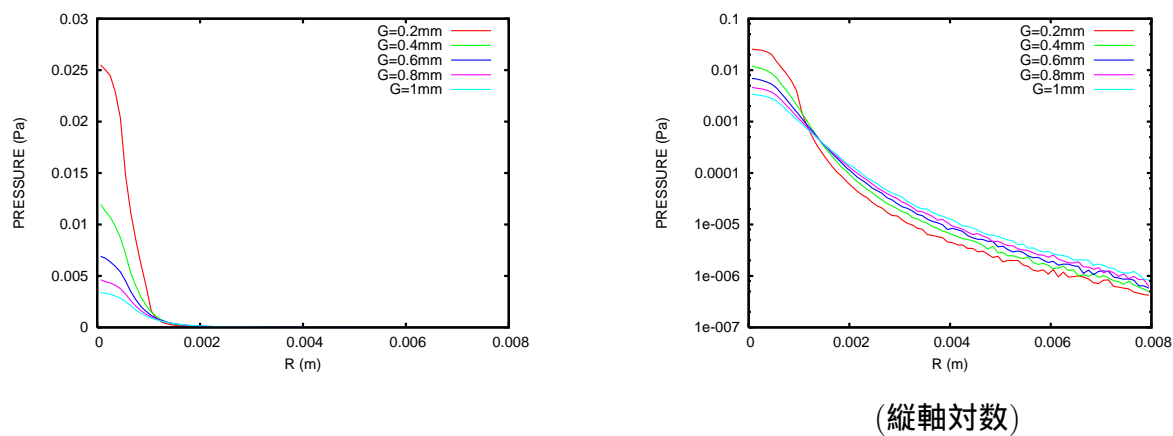


図 9 噴流が衝突する固体壁面上の径方向 (r 方向) 圧力分布

(5) ノズル中心軸方向 (x 方向) の分子数密度, 温度, 圧力の分布を図 10,11,12 に示す ($x = 0$ がノズル出口面)。

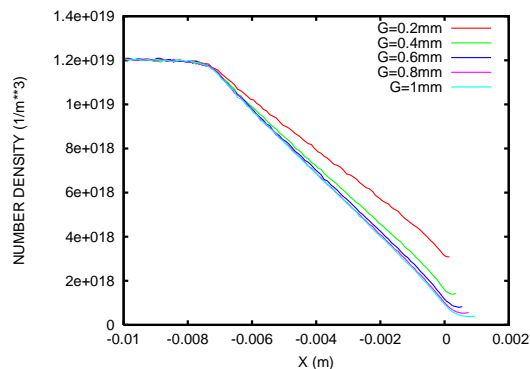


図 10 ノズル中心軸方向 (x 方向)
分子数密度分布

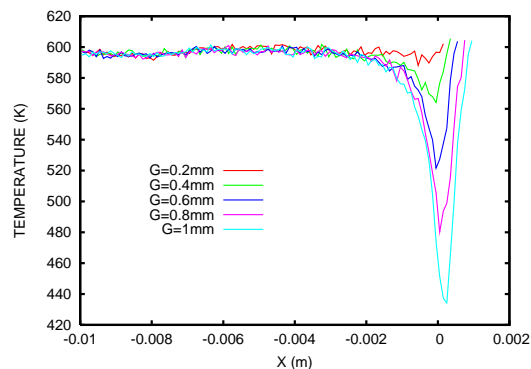


図 11 ノズル中心軸方向 (x 方向)
温度分布

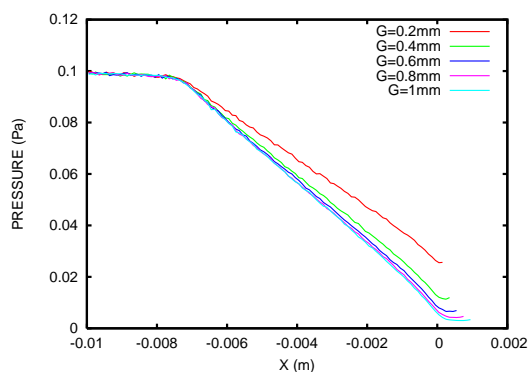


図 12 ノズル中心軸方向 (x 方向) 圧力分布

(6) ノズルからの流出流量と壁面位置 G との関係を図 13 に示す。

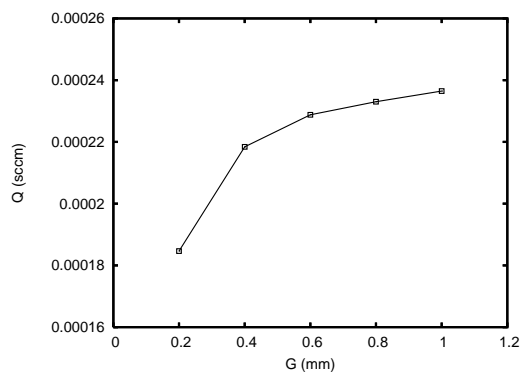


図 13 ノズル流出流量と壁面位置 G の関係

(7) ノズル出口近傍の流速ベクトルを図 14 に示す。

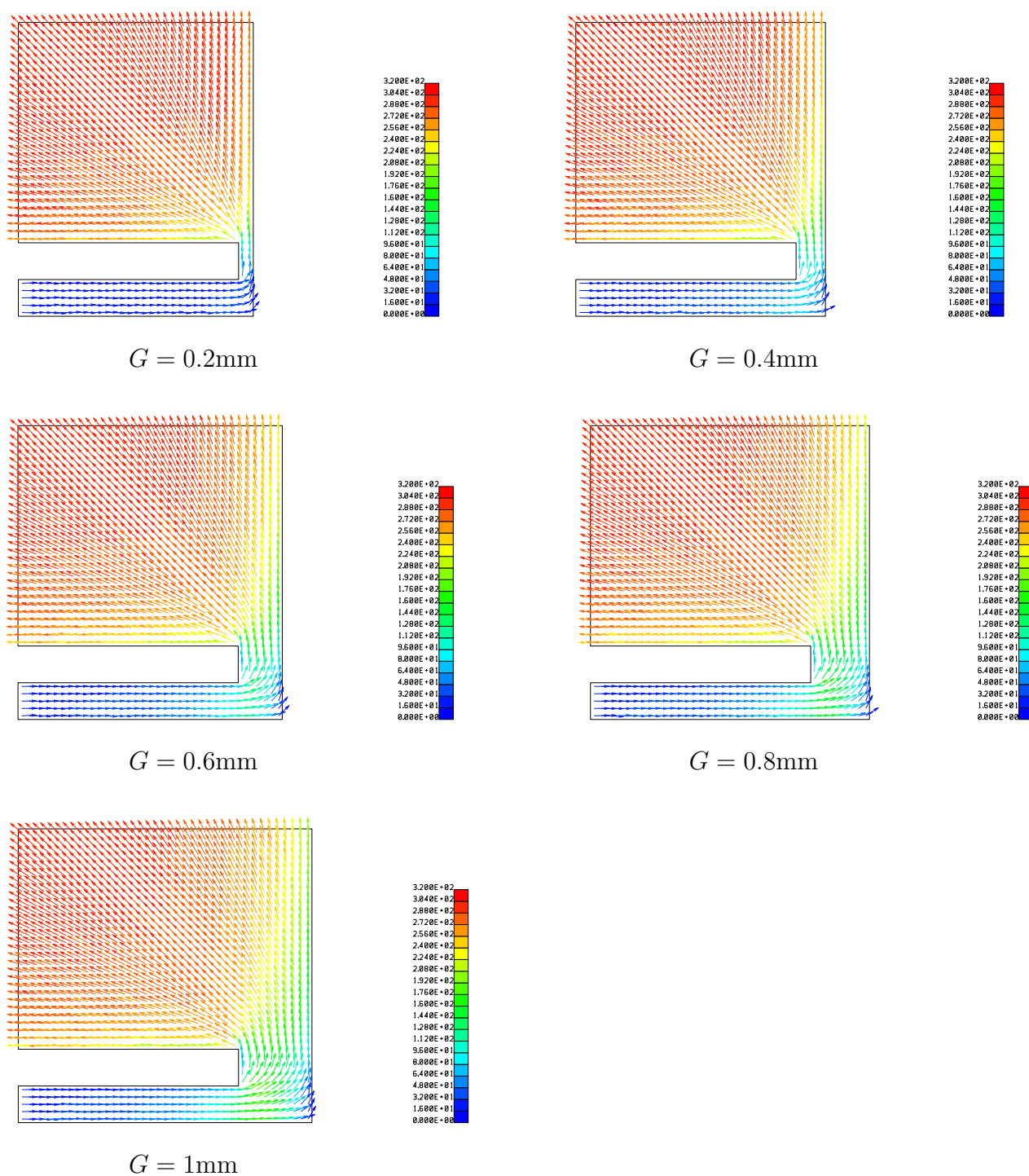


図 14 流速ベクトル図

● 検討

図 4,5,6 の全体図ではノズル出口面と固体壁面の距離 G の相違によるマクロ量分布の変化は、温度分布のノズル出口近傍を除いて読み取り難い。一方、図 7~12 のグラフによれば、 G が小さくなるほどノズル出口における分子数密度が大きく (圧力が高く) なっていることが分かる。これは、 G が小さくなるほどノズル出口面と噴流が衝突する固体壁面が形成する流路のコンダクタンスが低下し、ノズルからの流出流を抑制する効果が増大することによる。ただし、この抑制効果は $G = 0.2\text{mm}$ の場合が最も顕著で、 $G = 0.4\text{mm}$ 以上となると差は急激に小さくなる。このことは図 13 の流出流量と G の関係によく現れている。

気体運動論的な温度は x, y, z それぞれの方向の分子速度の分散の平均に比例するもので、温度が低いということは分子速度が揃っていることに対応することに注意すれば、 G の大きさとノズル出口近傍の温度分布の関係は以下のように説明される。

G が小さい場合、ノズル出口近傍の空間ではノズル下流に向かう分子数に対して噴流が衝突する固体壁面から反射した分子数が大きくなり、分子速度分布は固体壁面反射分子の分布と同様となり温度は下がらない。 G が大きい場合は、ノズル出口近傍の空間ではノズル下流に進む分子の数が多くなり、またこれらの分子の速度は下流に向けて揃っているため分子速度分布の分散が小さくなり温度は下がる。さらに下流の空間になると噴流が衝突する固体壁面から反射した分子が増え温度は再び上昇する。