

### 9.3 表面に温度分布を持つ球に作用する力と熱収支

#### 解析内容

温度  $T_\infty = 300\text{K}$ , 圧力  $p_\infty$  の静止アルゴンガス中に、表面温度分布を持つ直径  $D = 50\text{nm}$  の球が配置されている。この球に作用する力と熱収支をアルゴンガス圧力  $p_\infty$  を変化させて求める。球表面の温度分布は、球中心を貫く直径の一端 (北極) の温度が  $303.6\text{K}$ , 他端 (南極) の温度が  $300\text{K}$  で、この直径を軸とする天頂角  $\theta$  方向 (緯度変化方向) に線形に変化するものとする (図 9.3.1 参照)。

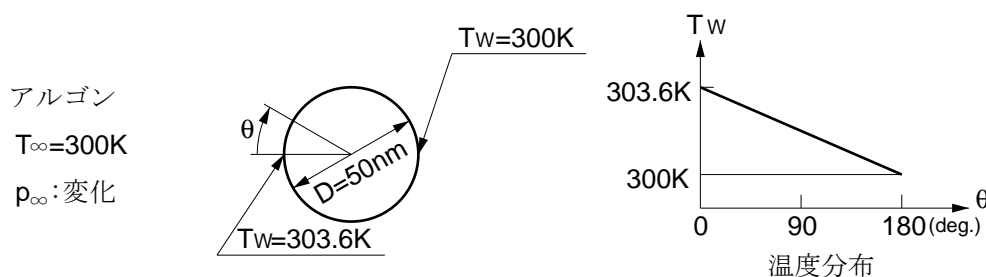


図 9.3.1 表面に温度分布を持つ球に作用する力と熱収支の計算モデル

#### 計算条件

##### ● アルゴンガス圧力 $p_\infty$

球周囲のアルゴンガス圧力  $p_\infty$  は、表 1 に示す 13 ケースとする。

$p_\infty$ (Pa)	$K_n$	$p_\infty$ (Pa)	$K_n$	$p_\infty$ (Pa)	$K_n$	$p_\infty$ (Pa)	$K_n$
$1.4130 \times 10^6$	0.1	$1.4130 \times 10^5$	1	$1.4130 \times 10^4$	10	$1.4130 \times 10^3$	100
$7.9460 \times 10^5$	0.17783	$7.9460 \times 10^4$	1.7783	$7.9460 \times 10^3$	17.783		
$4.4683 \times 10^5$	0.31623	$4.4683 \times 10^4$	3.1623	$4.4683 \times 10^3$	31.623		
$2.5127 \times 10^5$	0.56234	$2.5127 \times 10^4$	5.6234	$2.5127 \times 10^3$	56.234		

表 1 球周囲の圧力  $p_\infty$  とクヌーセン数  $K_n$

表中の  $K_n$  は、圧力  $p_\infty$ , 温度  $T_\infty$  におけるアルゴン分子の平均自由行程

$$\lambda = \frac{kT_\infty}{\sqrt{2}\sigma_T p_\infty}$$

と球直径  $D$  で定義されるクヌーセン数

$$K_n = \frac{\lambda}{D} = \frac{kT_\infty}{\sqrt{2}\sigma_T p_\infty} \frac{1}{D}$$

である ( $k$  はボルツマン定数  $k = 1.380658 \times 10^{-23}(\text{J/K})$ 、 $\sigma_T$  はアルゴン分子を剛体球とみなしたときの全衝突断面積  $\sigma_T = 4.1455 \times 10^{-19}\text{m}^2$ )。

- 時間ステップ幅  $\Delta t$

全ケースとも  $\Delta t = 10^{-12}\text{s}$  とした。

- 境界条件

球表面は、線形の表面温度分布を球表面のセル分割数 (36) の階段関数で近似し、その温度の拡散反射境界とする。軸に対応する境界は透過境界とし、その他の境界は温度  $T_\infty$ 、圧力  $p_\infty$ 、マクロ流入速度  $0\text{m/s}$  のアルゴンガス流入境界とする。

### セル分割

球中心に原点を取り、球表面の最高温度点と最低温度点を結ぶ直線を  $x$  軸とし、最低温度点側を  $x$  軸正の向きとする。解析領域は、球の中心から  $x$  軸方向に  $\pm 200\text{nm}$  の位置にある  $x$  軸に垂直な面を端面とする直径  $400\text{nm}$  の円筒領域とする (図 9.3.2 参照)。

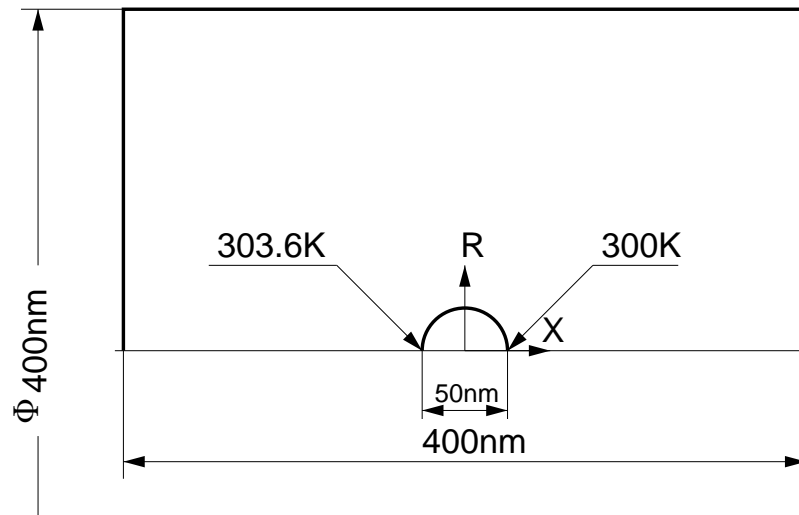


図 9.3.2 解析領域

軸対称問題として解析し、対称軸を含む面内を図 9.3.3 に示すようにセル分割する。

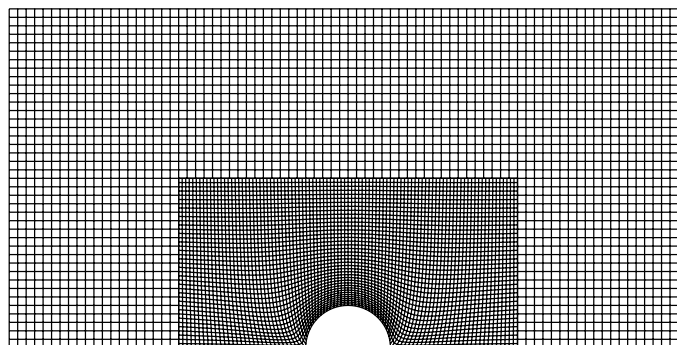


図 9.3.3 解析領域セル分割図 (軸対称解析 : 6240 セル)

## 結果

球に作用する  $x$  方向の力  $F_x$  とクヌーセン数  $K_n$  との関係を図 9.3.4 に示す。球に作用する力は球直径を直径とする円板面に作用する力  $F = p_\infty(\pi/4)D^2(\text{N})$  で無次元化してある。

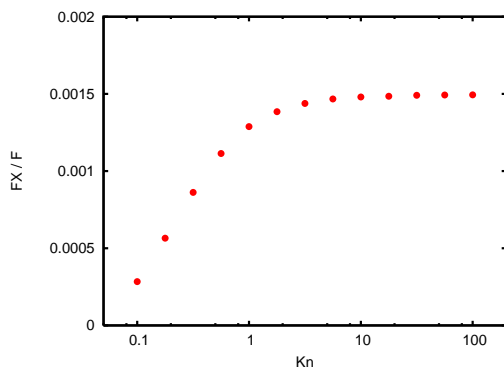


図 9.3.4 球に作用する  $x$  方向の力とクヌーセン数の関係

気体から球への伝熱量  $Q$  とクヌーセン数  $K_n$  との関係を図 9.3.5 に示す。球への伝熱量は、無限に広がる圧力  $p_\infty$ , 温度  $T_\infty$  の気体から自由分子流状態における表面温度  $T_{ave} = (303.6 + 300)/2 = 301.8\text{K}$ (高温点と低温点の温度の平均) の球への伝熱量  $Q_{free}$

$$Q_{free} = \sqrt{2\pi RT_\infty} D^2 p_\infty \left(1 - \frac{T_{ave}}{T_\infty}\right) \quad (\text{W})$$

で無次元化してある ( $R$  は単位質量当り気体定数で、アルゴンの場合  $R=208.1333\text{J}/(\text{kgK})$ )。

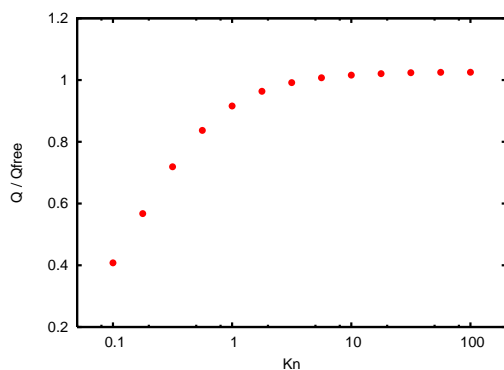


図 9.3.5 気体から球への伝熱量とクヌーセン数の関係

$T_{ave}(= 301.8\text{K}) > T_\infty(= 300\text{K})$  であるので  $Q_{free} < 0$  となり、熱は球から気体に伝わる。

球近傍の速度ベクトル図を図 9.3.6~9.3.9 に示す。

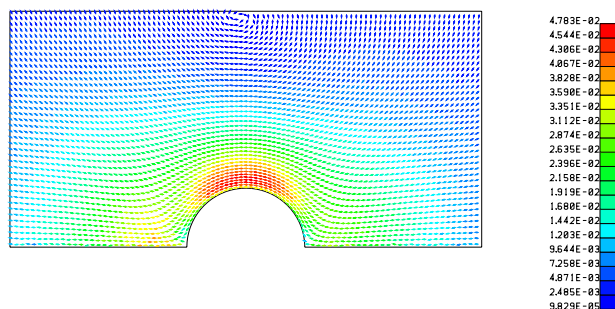


図 9.3.6 球近傍の速度ベクトル図 ( $K_n = 0.1$ ) (m/s)

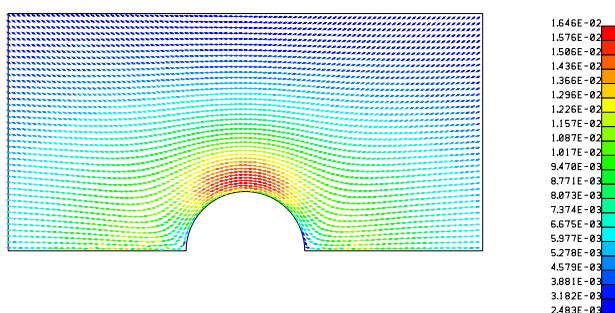


図 9.3.7 球近傍の速度ベクトル図 ( $K_n = 1$ ) (m/s)

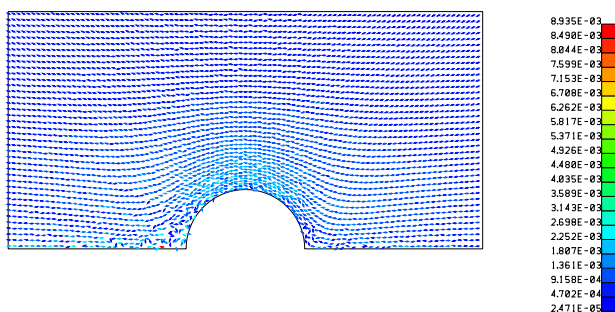


図 9.3.8 球近傍の速度ベクトル図 ( $K_n = 10$ ) (m/s)

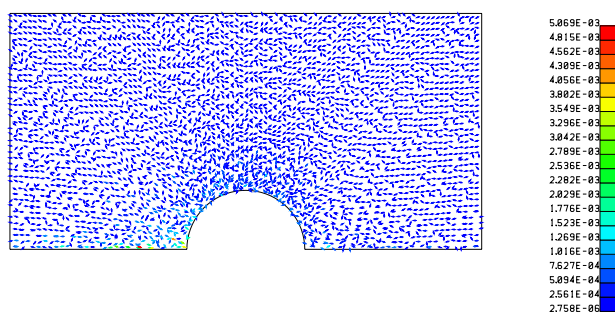


図 9.3.8 球近傍の速度ベクトル図 ( $K_n = 100$ ) (m/s)

球近傍の熱流束ベクトル図を図 9.3.10~9.3.13 に示す。

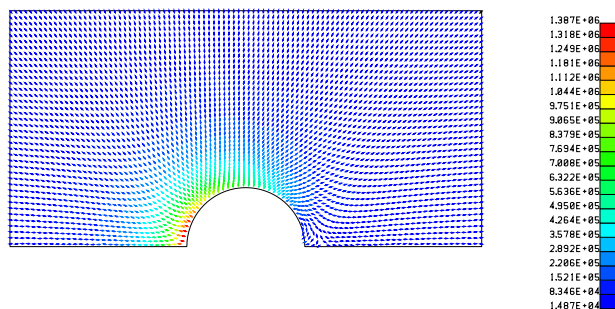


図 9.3.10 球近傍の熱流束ベクトル図 ( $K_n = 0.1$ ) ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

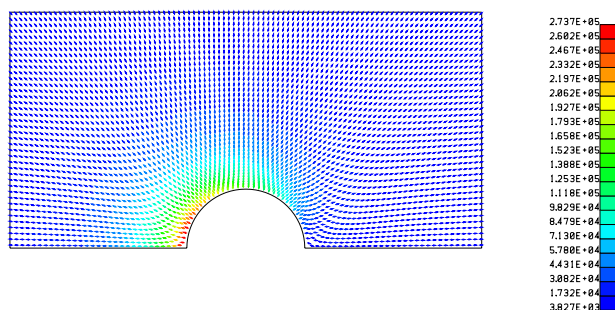


図 9.3.11 球近傍の熱流束ベクトル図 ( $K_n = 1$ ) ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

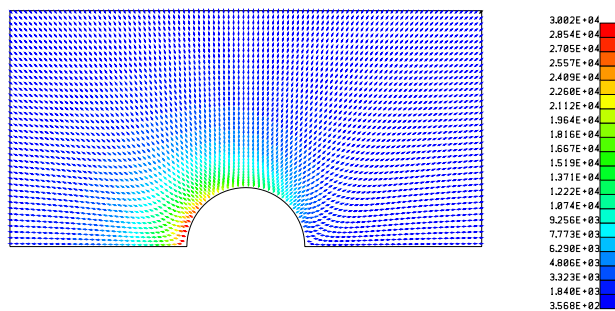


図 9.3.12 球近傍の熱流束ベクトル図 ( $K_n = 10$ ) ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

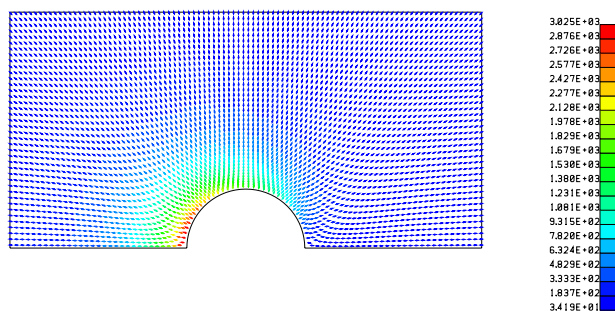


図 9.3.13 球近傍の熱流束ベクトル図 ( $K_n = 100$ ) ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

### 検討

● 図 9.3.4 によれば、球には  $x$  軸正の向きの力 (表面温度の高温側から低温側向きの力) が作用している。これは、希薄度が増すと、球に衝突する分子は球表面温度の影響のない (球から反射した分子と衝突していない)  $T_{\infty} = 300\text{K}$  の周囲気体中の分子が多くなり衝突分子が球に与える力は球面上で一様になるのに対して、球に衝突した分子が拡散反射する際に球に与える力は高温側から反射した分子の方が低温側から反射した分子より大きくなり、差し引き  $x$  軸正の向きの力が球に作用することによる。

さらに、球の低温側から高温側に向かう熱ほふく流の反作用も球に  $x$  軸正の向きの力を作用する。この熱ほふく流の影響はクヌーセン数が大きくなるにつれて小さくなるため (図 9.3.6~9.3.9 参照)、無次元化力  $F_x/F$  はクヌーセン数の大きい領域ではほぼ一定となっている。

● 球から気体への伝熱量は、クヌーセン数が大きくなるにつれ表面温度一定の球からの伝熱量より若干大きな値となる。これは無次元化定数計算のための設定表面温度が球表面の最高温度と最低温度の平均としたことによるものと思われる。

● 図 9.3.6~9.3.9 によれば、球の周囲には流れが誘起されており、この流れは球表面温度の分布に起因する熱ほふく流が主因と思われる。流れは  $K_n = 0.1$  の場合が最も強く渦の発生も見られる。クヌーセン数が大きくなるにつれ流れは弱くなっている。

● 図 9.3.10~9.3.13 によれば、熱流束ベクトルのパターンにクヌーセン数の影響は少なく、熱流束ベクトルの強さのみがクヌーセン数に依存している。

### 計算時間

Core i7 2.67Ghz 搭載パソコンで

$K_n = 1$  の場合、15 時間程度

$K_n = 100$  の場合、15 時間程度。