

8.2 一様流中に置かれた球に作用する抗力と球への伝熱量 (自由分子流)

一様流中に置かれた球周りの自由分子流を解析し、一様流速 U と球に作用する抗力 F_D 、球への伝熱量 Q との関係性を求め理論解 [1] と比較する。

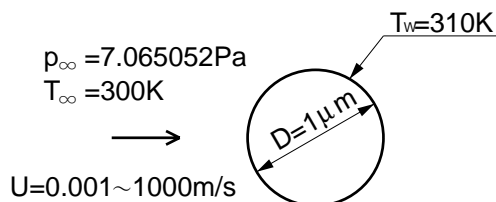


図 8.2.1 一様流中に置かれた球 (自由分子流)

球条件

直径 $D = 1\mu\text{m}$, 表面温度 $T_w = 310\text{K}$, 表面条件 : 拡散反射境界

一様流条件

気体種 = アルゴン (単位質量当たり気体定数 $R = 208.1333\text{J}/(\text{kgK})$ 、分子を剛体球とみなしたときの全衝突断面積 $\sigma_T = 4.1455 \times 10^{-19}\text{m}^2$), 圧力 $p_\infty=7.065052\text{Pa}$, 温度 $T_\infty=300\text{K}$

この設定は、平均自由行程 $\lambda = kT_\infty/(\sqrt{2}\sigma_T p_\infty)$ (k はボルツマン定数) と球直径 D で定義されるクヌーゼン数 $K_n = \lambda/D$ が $K_n = 1000$ となる設定になっている。

解析領域

球中心から一様流方向に $\pm 5\mu\text{m}$ 、一様流と垂直方向に $3\mu\text{m}$ の円筒領域を解析領域とする。軸対称問題として解析し、対称軸を含む面内のセル分割図を図 8.2.2 に示す (841 セル)。

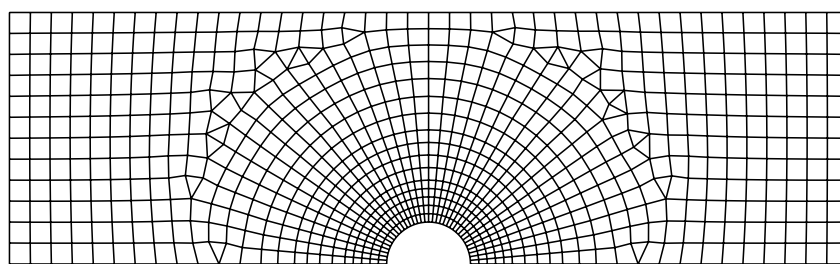


図 8.2.2 解析領域のセル分割図 (軸対称解析)

結果

一様流速 U を、 $10^{-3}\text{m/s} \sim 10^3\text{m/s}$ の範囲で変化させた場合の一様流速 U と球に作用する抗力 $F_D(\text{N})$ 、球への伝熱量 $Q(\text{W})$ との関係を図 8.2.3, 図 8.2.4 に示す。図中実線は文献 [1] の理論解である。

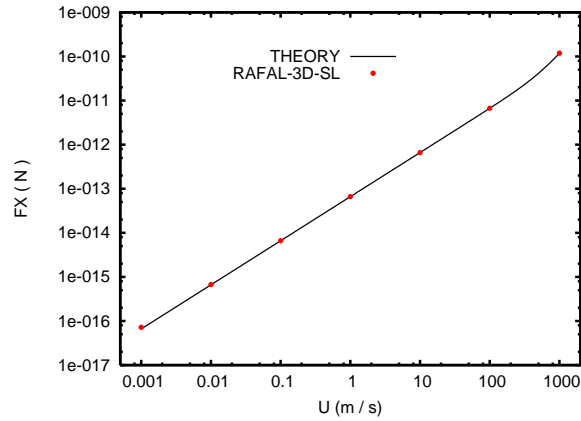
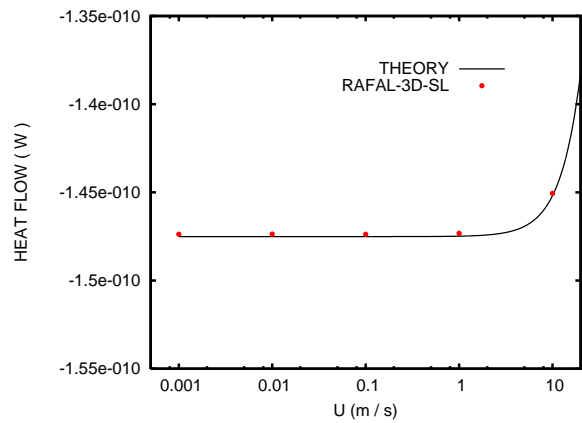
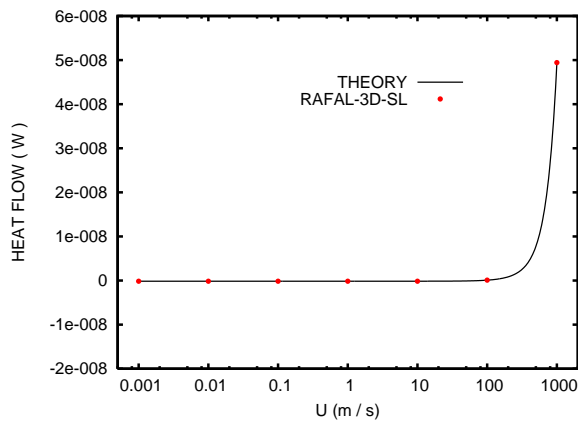


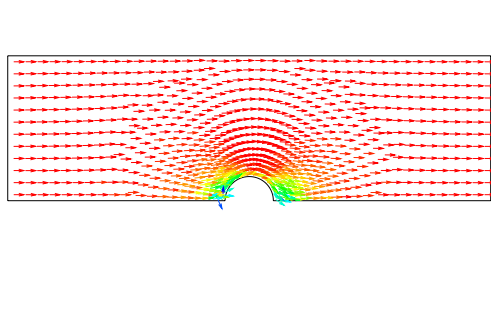
図 8.2.3 球に作用する抗力と一様流速の関係



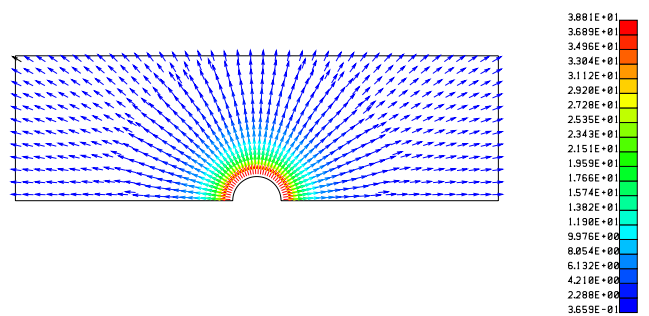
低速部拡大図

図 8.2.4 球への伝熱量と一様流速の関係

図 8.2.5 に一様流速 $U = 0.01, 1, 10, 100\text{m/s}$ の場合の流速と熱流束のベクトル図を示す。



流速ベクトル ($U = 0.01\text{m}$)



熱流束ベクトル ($U = 0.01\text{m}$)

図 8.2.5 流速ベクトル (m/s) と熱流束ベクトル (W/m^2)

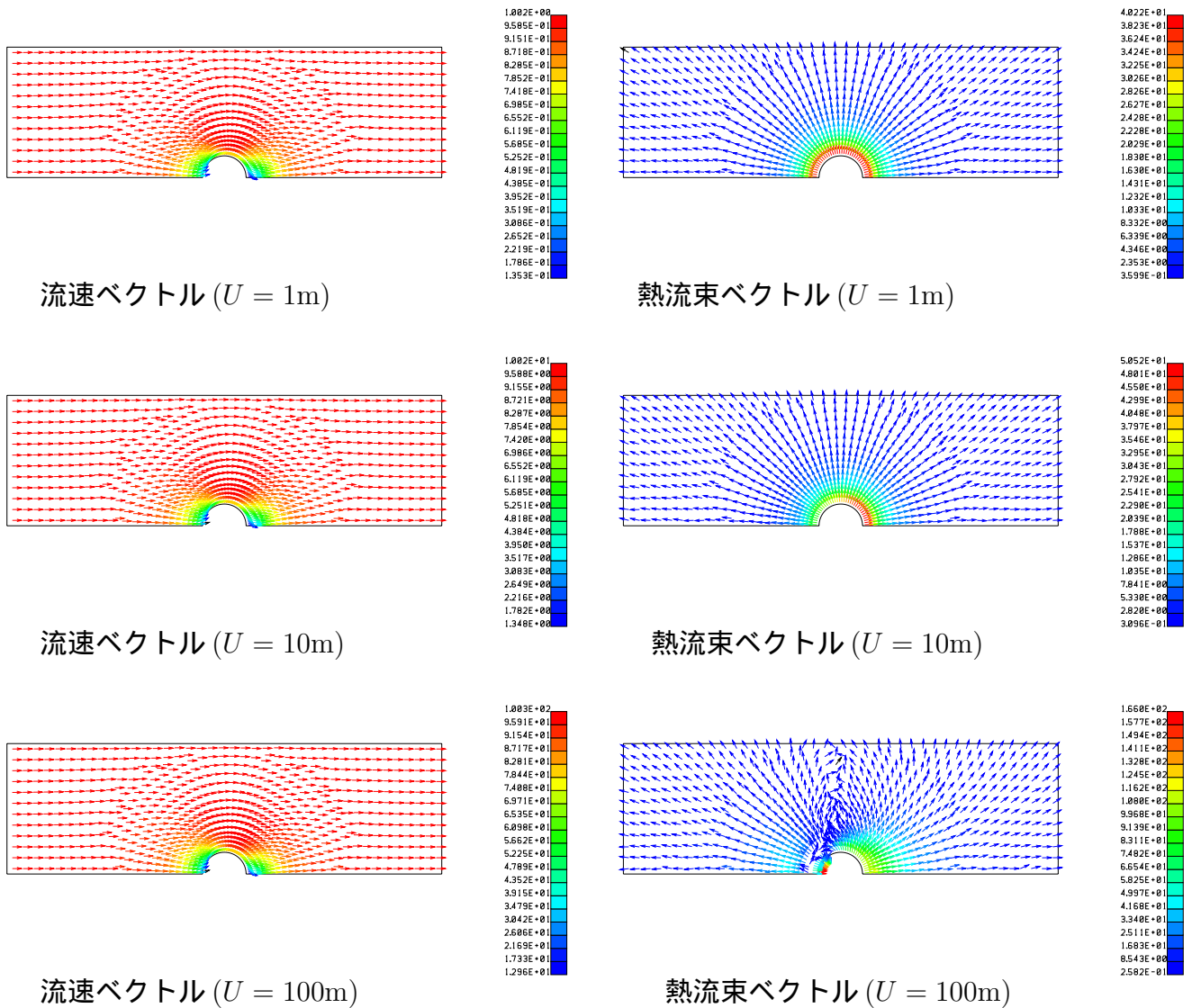


図 8.2.5(続き) 流速ベクトル (m/s) と熱流束ベクトル (W/m²)

計算時間

Core i7 2.67Ghz 搭載パソコンで 8~24 時間程度 (一様流速の値と要求精度による)。

参考文献

[1]Schaaf,S.A. and Chambre,P.L. : Flow of rarefied gases, High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion Vol.3,Fundamentals of gas dynamics(1958),pp.687-739.