

8.1 一様流中に置かれた円柱に作用する抗力と円柱への伝熱量 (自由分子流)

一様流中に置かれた円柱周りの自由分子流を解析し、一様流速 U と円柱に作用する抗力 F_D 、円柱への伝熱量 Q との関係を求め理論解 [1] と比較する。

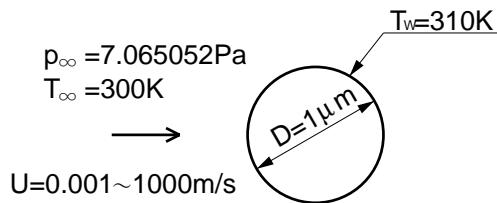


図 8.1.1 一様流中に置かれた円柱 (自由分子流)

円柱条件

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) と円柱直径 D で定義されるクヌーセン数 $K_n = \lambda/D$ が $K_n = 1000$ となる設定になっている。

解析領域

円柱中心から一様流方向に $\pm 5\mu\text{m}$ 、一様流と垂直方向に $\pm 3\mu\text{m}$ の長方形領域を設定し、問題の対称性からこの領域の上半分を解析領域とする。セル分割図を図 8.1.2 に示す (841 セル)。

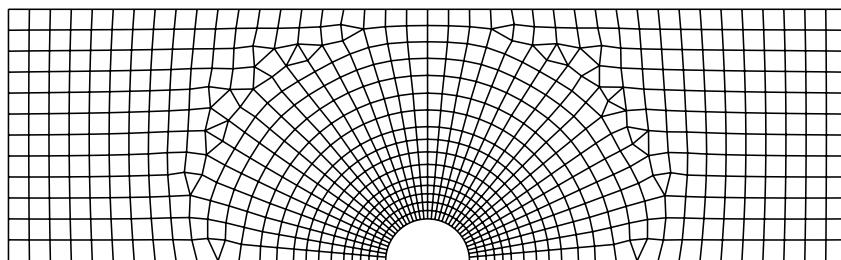


図 8.1.2 解析領域のセル分割図 (2 次元解析)

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 と円柱単位長さに作用する抗力 $F_D(\text{N/m})$ 、円柱単位長さへの伝熱量 $Q(\text{W/m})$ との関係を図 8.1.3, 図 8.1.4 に示す。図中実線は文献 [1] の理論解である。

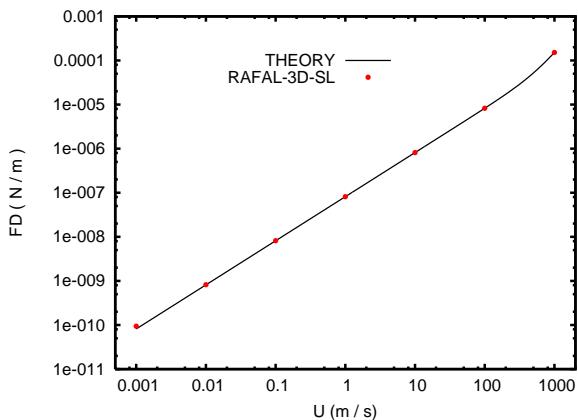
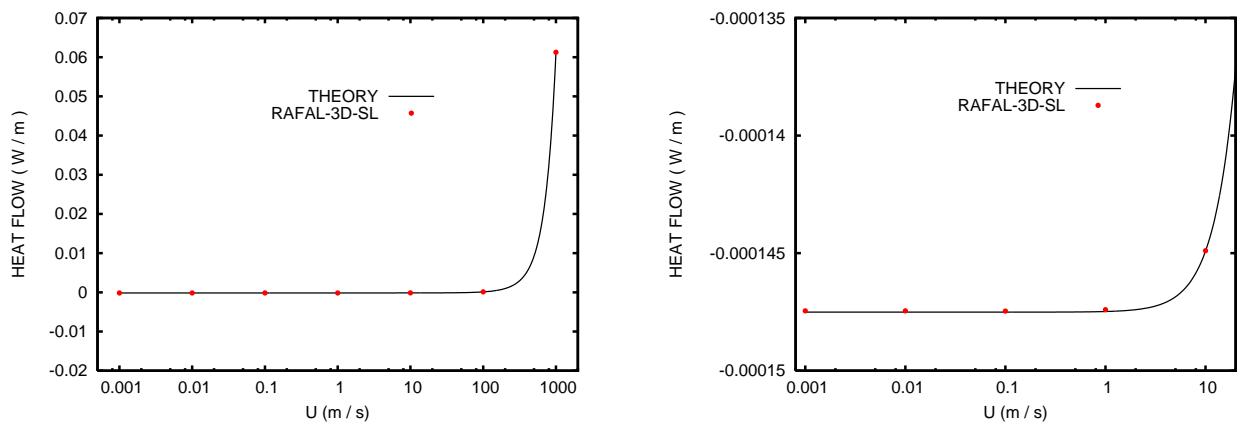


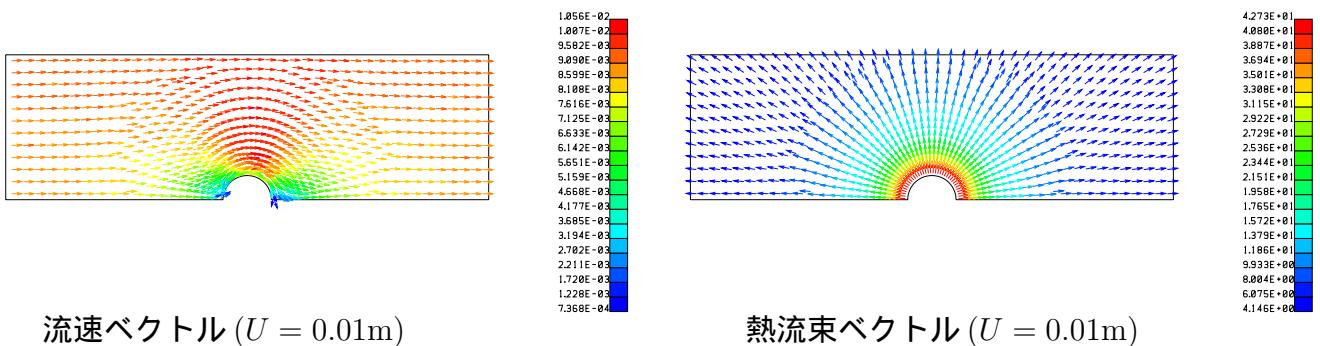
図 8.1.3 円柱単位長さに作用する抗力と一様流速の関係

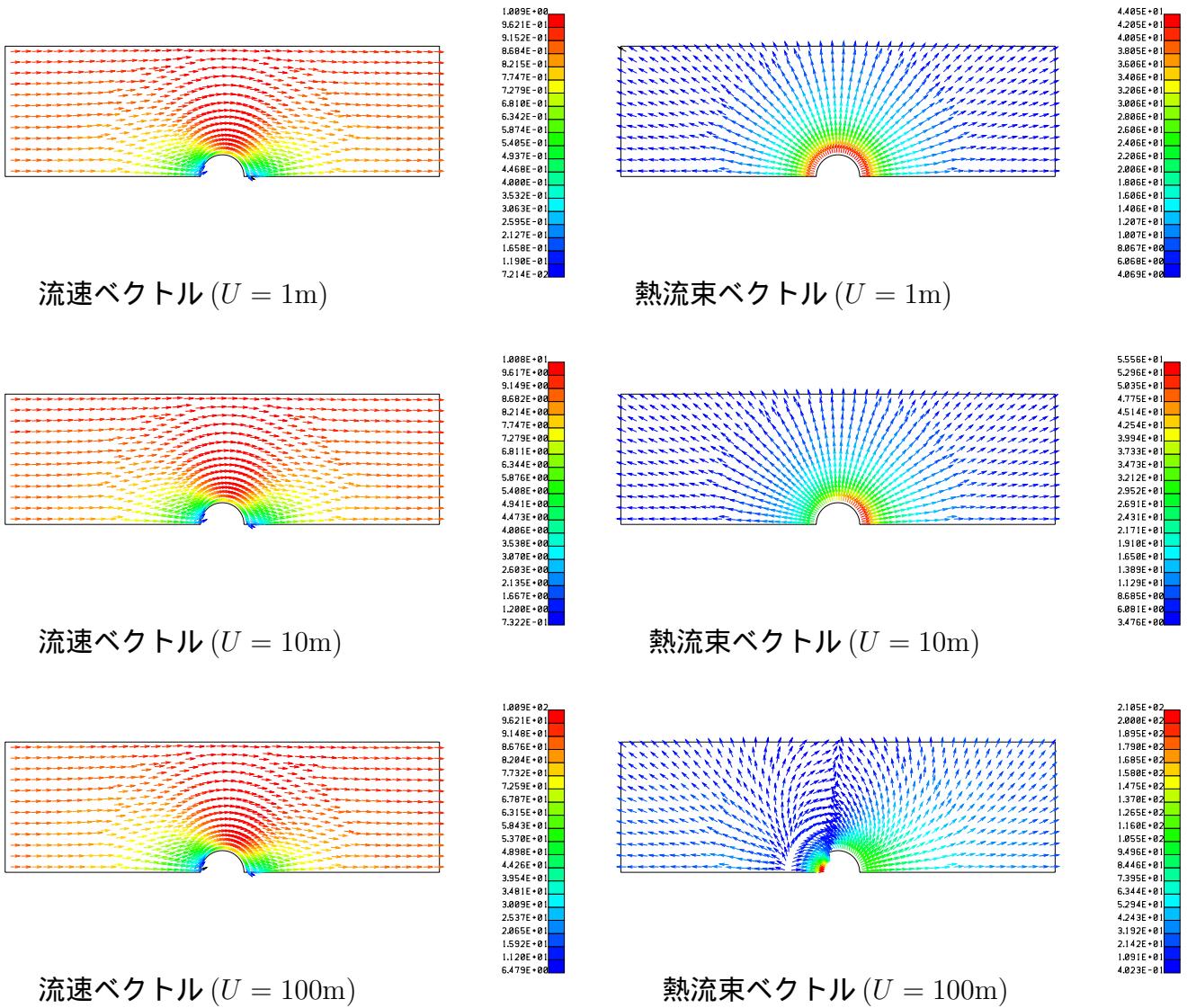


低速部拡大図

図 8.1.4 円柱単位長さへの伝熱量と一様流速の関係

図 8.1.5 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。

図 8.1.5 流速ベクトル (m/s) と熱流束ベクトル (W/m^2)

図 8.1.5(続き) 流速ベクトル (m/s) と熱流束ベクトル (W/m^2)

計算時間

Core i7 2.67Ghz 搭載パソコンで 16~24 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.