

令和7年度弁理士試験論文式筆記試験問題

[流体力学]

- 1 図1は、半径 r_0 の円管における完全発達した円管内流れ（ニュートン流体、非圧縮性流れ）の速度分布を、流れが層流と乱流の場合で比較したもので、円管軸方向の速度成分 u の分布を中心からの半径方向距離 r の関数として示している。両者の場合において、断面平均速度 U は等しいとする。また、図2は、完全発達した円管内流れにおける管摩擦係数 λ とレイノルズ数 Re の関係を表すグラフの模式図である。以下の設問に答えなさい。

【50点】

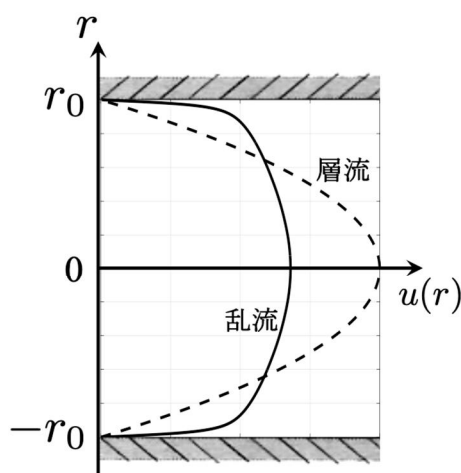
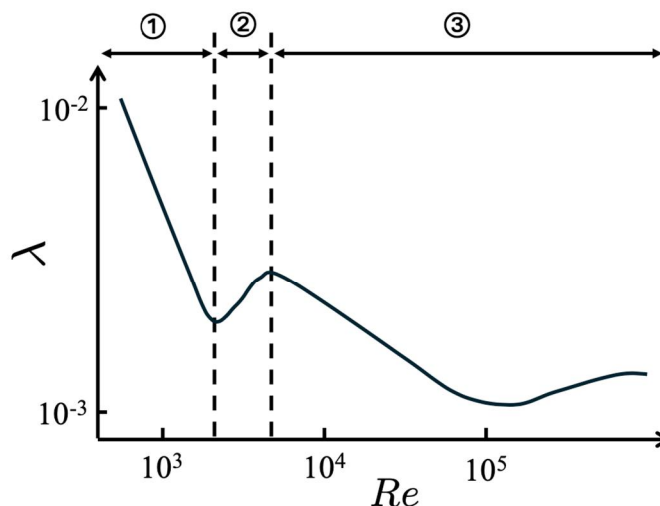


図1：層流と乱流の速度分布

図2：管摩擦係数 λ とレイノルズ数 Re の関係

- (1) レイノルズ数は、円管の直径 $2r_0$ 、断面平均速度 U と流体の密度 ρ 、粘性係数 μ を用いて

$$Re = \frac{2r_0 \rho U}{\mu} \quad (1)$$

と定義される。レイノルズ数 Re の物理的解釈を簡潔に述べなさい。

- (2) 図1に示されるように、完全発達した円管内流れの速度分布は、層流の場合には放物線型の曲線となり、

$$u(r) = 2U \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \quad (2)$$

と表される。この時の壁面摩擦応力 τ_w を断面平均速度 U 、円管半径 r_0 、流体の密度 ρ 、粘性係数 μ の中から適当なものを用いて表しなさい。

(次頁へ続く)

- (3) 図1に示される層流と乱流の速度分布の形を比較すると、乱流状態の方が管中心付近の速度分布がより扁平な形となり、壁面付近の速度勾配が増加している。速度分布の形にこのような違いが生じる理由を、

「乱流」 「渦運動」 「混合」

という3つの語句を全て用いて1、2行程度で説明しなさい。

- (4) 図1で比較される層流状態と乱流状態では、壁面摩擦応力 τ_w はどちらの場合の方が大きいのか答えなさい。

- (5) 管摩擦係数 λ の定義は、円管内流れの場合、

$$\lambda = \frac{8}{\rho U^2} \tau_w \quad (3)$$

で与えられる。図2に示されるように、管摩擦係数 λ は領域①においてはレイノルズ数 Re に反比例して減少するが、領域②においてはレイノルズ数 Re の増加と共に急激に増大し、領域③においては再び減少に転じるが、減少率は領域①に比べ小さい。

図2のグラフは、「円管半径 r_0 、断面平均速度 U 、流体の密度 ρ を固定し、粘性係数 μ のみを減少させながら、壁面摩擦応力 τ_w を測定する実験を行い、その結果を粘性係数 μ の逆数に対してプロットしたグラフ」と捉えることができる。

以下の文章は、この観点から管摩擦係数 λ の振る舞いが図2のようなになる理由を説明している。この空欄部分を埋める適当な語句を、下の選択肢から選びなさい。同じ語句を複数回選択しても良い。

【説明】 低レイノルズ数域である領域①では、流れは（ ア ）状態であり、速度分布は式（2）により表されるため、円管半径 r_0 と断面平均速度 U を固定した場合、壁面における速度勾配は粘性係数 μ に依らず一定である。壁面摩擦応力 τ_w は粘性係数 μ と壁面における速度勾配の積により得られるため、領域①における壁面摩擦応力 τ_w は粘性係数 μ に（ イ ）し、その結果、レイノルズ数 Re に（ ウ ）する。一方、領域②においては（ エ ）が起こり、（ オ ）による（ カ ）が生じて壁面速度勾配が急激に増大する。これにより粘性係数 μ が減少しているにもかかわらず、壁面摩擦応力 τ_w は急激に増大する。それ以降の領域③においても、（ キ ）による（ ク ）は粘性係数 μ の減少に伴って顕著になり壁面速度勾配を増加させるため、この領域における壁面摩擦応力 τ_w の減少率は領域①に比べ小さい。

<選択肢>

密度	粘性	圧縮性	運動量輸送	熱輸送
比例	反比例	剥離	圧力抵抗	摩擦抵抗
壁面速度勾配	層流	乱流	乱流遷移	再層流化

- 2 図3は主流速度 U_∞ の一様な非圧縮性流れ中に、主流に対して垂直に置かれた円柱（直径 d ）における抗力係数 C_D のレイノルズ数 Re_d に対する変化を表すグラフの模式図である。ここでそれぞれの定義は

$$C_D = \frac{D}{0.5 \rho U_\infty^2}, \quad Re_d = \frac{\rho U_\infty d}{\mu} \quad (4)$$

であり、 D は円柱に働く全抵抗、 ρ と μ は流体の密度と粘性係数である。図3に示されるように、 C_D は $Re_d \approx 1$ 以下の非常に低いレイノルズ数域（領域 I）においては概ね Re_d に反比例し、 $Re_d \approx 10^3 \sim 10^5$ の比較的高いレイノルズ数域（領域 II）においては Re_d に依存せずほぼ一定値を示す。以下の設問に答えなさい。

【50点】

- (1) 主流の圧力を p_∞ として、円柱の前方淀み点における圧力 p_0 を求めなさい。
- (2) 円柱に働く全抵抗 D は、摩擦抵抗と圧力抵抗の和として表される。図3に示す領域 I 及び領域 II それぞれについて、摩擦抵抗と圧力抵抗のうちどちらが支配的か答えなさい。その際、円柱周りの流れの様子を図示しつつ、理由を簡潔に説明しなさい。
- (3) 設問1の図2の解釈と同様に、図3のグラフも「主流速度 U_∞ 、円柱直径 d 、流体の密度 ρ を一定とし、粘性係数 μ のみを変化させて円柱に働く全抗力 D を測定し、 μ の逆数に対してプロットしたグラフ」と捉え、領域 I と領域 II における抗力係数 C_D の振る舞いがなぜ図3のようになるのか簡潔に説明しなさい。
- (4) 図3では、矢印 III が示すレイノルズ数において抗力係数の急激な減少が見られる。この理由を、「境界層」、「剥離」、「圧力抵抗」という言葉を用いて1、2行程度で説明しなさい。

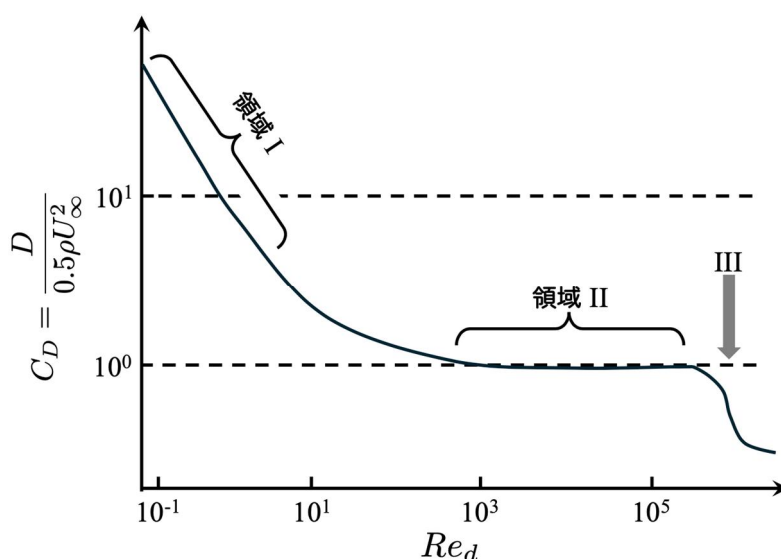


図3：一様流中の円柱における抗力係数 C_D とレイノルズ数 Re_d の関係