

1. 目的

航空機開発や気象予報など様々な分野において流体力学は必要不可欠である。この実験では、円管内の流れを測定し、流れに対する粘性の作用を考察する。

2. 理論

2.1 円管内を流れる流体 [1]

円管内を流れる流体の流れは大きく層流と乱流に分類できる。層流は流量が少ないとき発生し、流体は管壁に対して平行かつ層状に流れる。一方で乱流は流量が多いとき発生し、流体は管壁に対して無秩序な軌道で流れる。層流から乱流への遷移はレイノルズ数 Re という無次元数に依存し、以下の式で与えられる。

$$Re = \frac{U_b D}{\nu} \quad (1)$$

ここで U_b は断面平均流速、 ν は動粘性係数、 D は管内径である。レイノルズ数 Re は無次元数であるため、様々な流れにおいて同様の数値を適用できる。特に $Re \simeq 2000 \sim 2300$ を臨界レイノルズ数 Re_c と呼び、層流と乱流の遷移が起きる。

また、層流における流速の勾配はポアズイユによって与えられ、中心から r の位置での流速 u は、管の内径 R と長さ L 、両端の圧力 P_1, P_2 、粘性係数 μ を用いて以下の式で与えられる。

$$u = \frac{P_1 - P_2}{4\mu L}(R^2 - r^2) \quad (2)$$

(2) 式から層流の流速は壁面上で 0、管の中央で最大値をとる 2 次曲線に従い分布する。

2.2 染料注入法について [1]

染料注入法とは流れの可視化の手法の一つである。流れの中にわずかに染料を流すことで、流れの軌道を可視化することができる。

2.3 LDV について [5]

LDV とはレーザー光の干渉を用いて流れの流速を測定する装置である。2 つのコヒーレントな光束を一点で交差させると、その交点では干渉縞が発生する。その点に流体中のホコリなどの大きな粒子が通過すると、干渉縞が散乱する。LDV ではその散乱光を光電素子などで測定する。干渉縞中を粒子が高速で通過すると、散乱光の時間幅は短くなり、遅く通過すると時間幅が長くなる。干渉

縞の間隔 δ は, レーザーの交差角を 2θ , 波長を λ とすると

$$\delta = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (3)$$

なので, 速度 U_c で粒子が交点を通過した時に観測されるバースト信号の周波数 f は

$$f = \frac{2U_c \sin \theta}{\lambda} \quad (4)$$

となる. したがって検出された縞の周波数 f と干渉縞の間隔 δ を用いて, 流れの流速 U_c は以下のように与えられる.

$$U = f\delta \quad (5)$$

3. 実験方法

図に示すような管路を用いて実験を行った. 管路 A は染料注入法, 管路 B は LDV 計測に用いた. ただし用いる流体は水である.

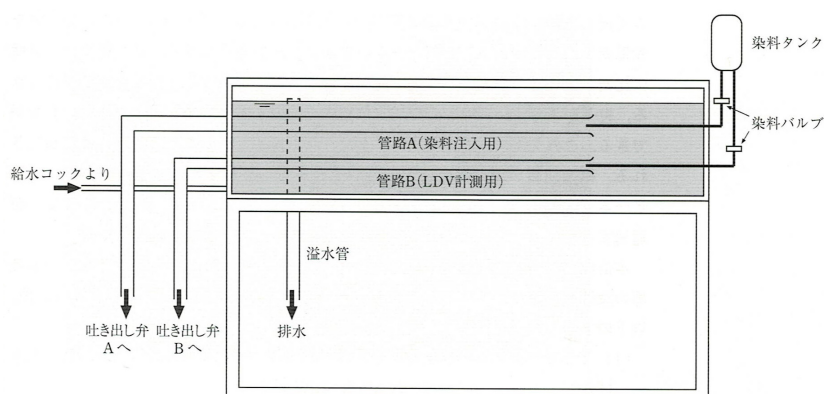


図 1 実験装置 [1]

3.1 染料注入法による流れの可視化

給水コックを開き, 装置内に給水した. 水面が溢水管面に達してから吐き出し弁 A を開き, 管路 A にわずかに水が流れる状態にした. 染料バルブを少し開き, 染料を流した. ただし染料の流量は流れを乱さないように最低限の流量とする. 出口にビーカーを置き, 定量が満ちるまでの時間から平均の流量を測定した. レイノルズ数 $Re \simeq 1400, 2300, 6500$ における流れの様子をスケッチした.

3.2 LDV による流速測定

§3.1 で示したのと同様な手順で管路 B に水を流した. ビームの交差点が流れのほぼ中央にあることを確認し, 測定を行った. PC の LDV 計測ソフトウェアを起動し, パラメータを設定した. パー

スト信号を捉えるように Input Range と Trigger Level を調整した。調整後、数値が落ち着いたところで測定を行った。同様にレイノルズ数 $Re \sim 1400, 2300, 6500$ でも測定を行った。

4. 結果・考察

動粘性係数 ν は $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ で $\nu = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ で $\nu = 0.893 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であることから、線形補間を用いて、 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ では $\nu = 0.982 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ となる。

4.1 染料注入法による流れの可視化

4.1.1 結果

図 2 に管内の流れの様子スケッチを示す。また表に各レイノルズ数での平均流速 U_b を示す。ただし管路 A の内径は 0.035 m である。

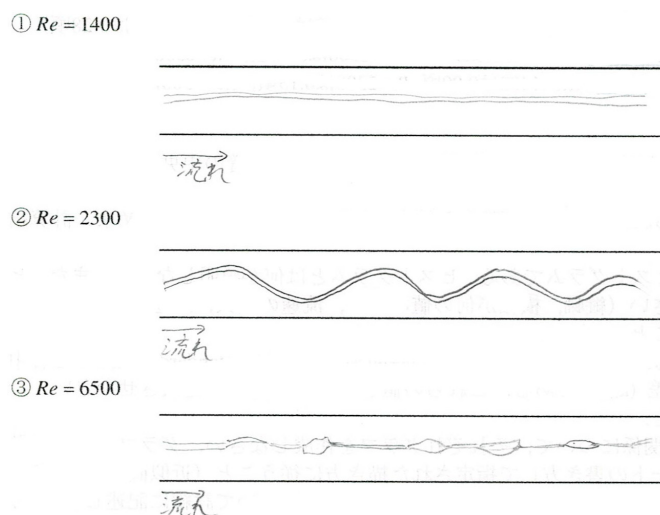


図 2 各レイノルズ数での流れのスケッチ

表 1 各レイノルズ数での平均流速

レイノルズ数 Re	断面平均流速 $U_b / \text{m s}^{-1}$
1400	3.9×10^{-2}
2300	6.5×10^{-2}
6500	1.8×10^{-1}

4.1.2 考察

レイノルズ数 Re が臨界レイノルズ数 Re_c より低いとき、流れは管壁に平行な直線であった。 Re が Re_c に近づくと、流れは振動し、徐々に振幅が大きくなり、周期が速くなっている。そして Re が

Re_c を完全に超えたところでは染料の流れは途切れ途切れになり、また線上の軌跡は見られず染料は拡散した。以上から、確かに臨界レイノルズ数 Re_c の前後で層流と乱流が遷移していることがわかった。

4.2 LDV による流速測定

表に各レイノルズ数での断面平均流速 U_b , 平均流速 U_c , u_{rms} , 乱流強度 u_{rms}/U_c , U_c/U_b を示す。また、図に各レイノルズ数での速度のヒストグラムを示す。

表 2 LVD による測定結果

Re	断面平均流速 U_b / ms^{-1}	平均流速 U_c / ms^{-1}	u_{rms} / ms^{-1}	$\frac{U_c}{U_b}$	$\frac{u_{rms}}{U_c}$
1400	0.0859	0.146	0.002	1.70	0.0119
2300	0.141	0.205	0.005	1.45	0.0251
6500	0.399	0.544	0.010	1.36	0.0179

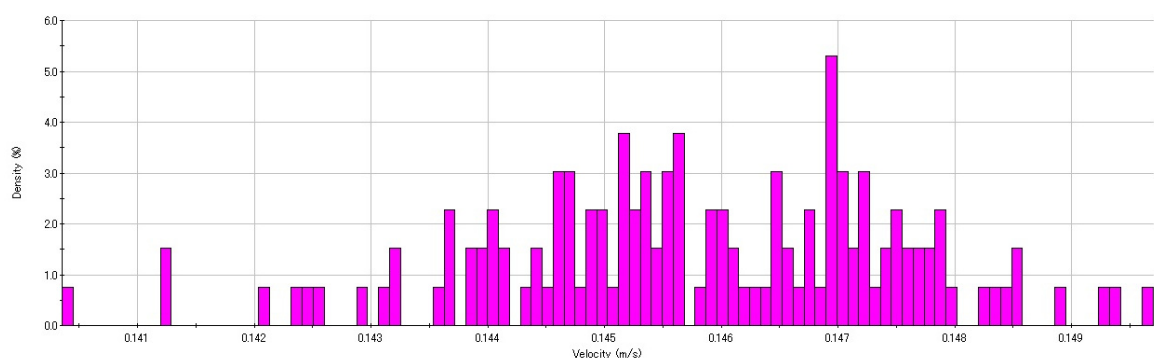


図 3 速度の度数分布 ($Re = 1400$)

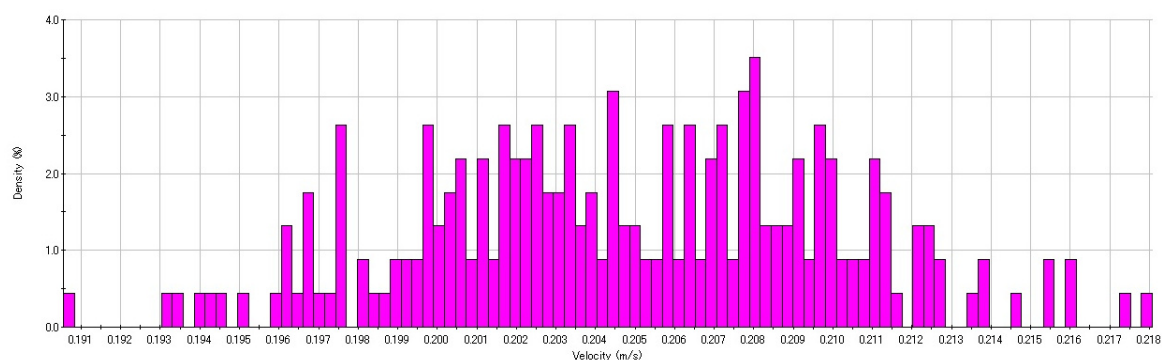


図 4 速度の度数分布 ($Re = 2300$)

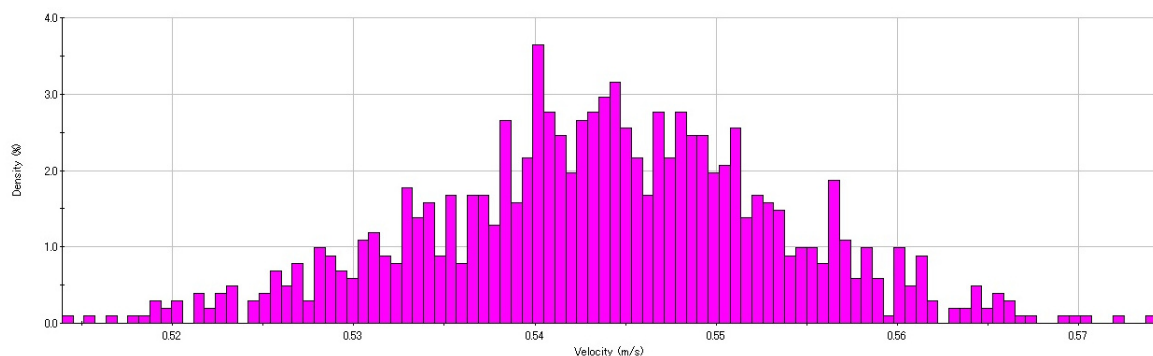


図 5 速度の度数分布 ($Re = 6500$)

4.2.1 考察

ヒストグラムについて

ヒストグラムとは度数分布を示すグラフで、縦軸にはある量が一定の範囲内に出現する回数(度数)、横軸にはその量を取っている。ここでの量は流速であるので、ヒストグラムは複数回の流速測定の結果の分布を示している。したがって各レイノルズ数での測定値の最大値、最小値は表 3 のようになる。

表 3 各レイノルズ数での測定値の最大値と最小値

Re	最大値 / m s^{-1}	最小値 / m s^{-1}
1400	0.150	0.140
2300	0.191	0.218
6500	0.574	0.515

レイノルズ数と U_c/U_b , u_{rms}/U_c の関係

図 6 にレイノルズ数 Re と U_c/U_b , 図 7 にレイノルズ数 Re と乱流強度 u_{rms}/U_c の関係を示す。レイノルズ数が小さいとき (2) 式のポアズイユの法則から、管の中心と管壁周辺では大きな流速差があり、その平均 U_b は中心での速度を u^r として $U_b \simeq u^r/2$ となる。一方で、レイノルズ数が大きくなると乱流により管内部での速度勾配が消え、平均流速 $U_b \simeq u^r$ となる。LDV は管の中心での流速を測定していることから $U_c \simeq u^r$ なので、 U_c/U_b はレイノルズ数が Re_c より小さい時 $U_c/U_b \simeq 2$, 大きいとき $U_c/U_b \simeq 1$ となると考えられる。図 6 から実際に $Re < Re_c$ で $U_c/U_b \simeq 2$ であり、また $Re \rightarrow \infty$ で $U_c/U_b \rightarrow 1$ へ漸近していることがわかる。

また、図 7 から、乱流強度 u_{rms}/U_c は臨界レイノルズ数 Re_c 付近でピークを持っていることがわかる。この理由として、 $Re < Re_c$ では層流が支配的であり、管中心での流量が安定しているため u_{rms} が低く、また $Re > Re_c$ では平均流量が大きくなり、乱流よりも平均の流れが支配的になるからだと考えられる。

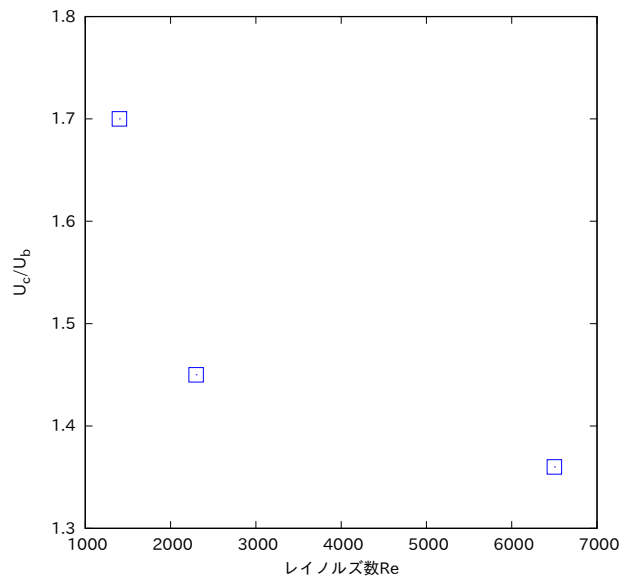


図 6 レイノルズ数と U_c/U_b の関係

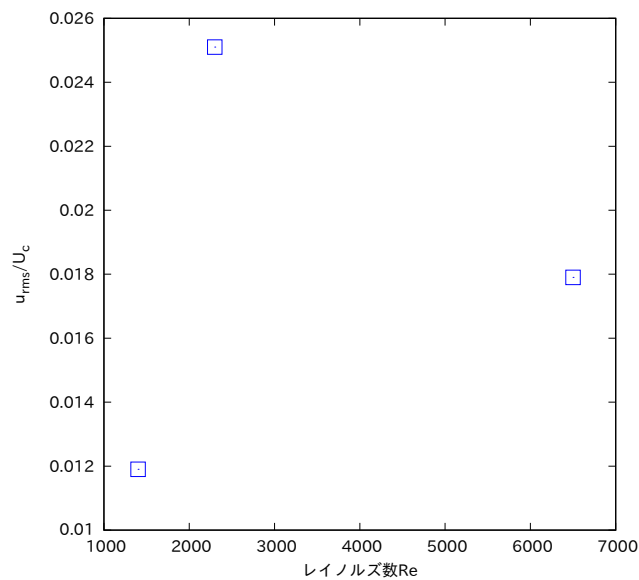


図 7 レイノルズ数と乱流強度 u_{rms}/U_c の関係

乱流強度を用いる理由

標準偏差を平均流速で除算することにより、乱流強度は無次元数になっている。値を無次元化したことにより、数値の実験系に対する依存を少なくし、様々な系での指標として用いられると考えられる。

層流・乱流の利用 航空機や自動車、大気、海洋など自然界の多くの流れ場は乱流が支配的である。したがってそれらの流れ場を解析する上で、乱流を発生させる乱流風洞が必要である [4]。乱流風洞では格子などを用いてカルマン渦を発生させ、意図的に乱流を作ることができる。一方で低速風洞などでは乱流強度が低く、層流が多い低乱風洞が必要になる [3]。低乱風洞では

金網などを用いて整流を行い, 乱流強度を低減する. また, 乱流は媒体の振動を伴うため大きな騒音を発生する, ためジェットエンジンなどではその抑制が研究されている [2]. 一方で, 航空機などの飛翔体においては翼端で乱流を発生させると, 流れの剥離を抑制し, 失速性能を高められることがわかってる. よって今日の航空機ではボルテックスジェネレータなどを用いて意図的に乱流を発生させ, 失速性能を高めている [6]. 同様のことはゴルフボールのディンプルなどで経験的に知られていた.

5. 結論

実験から, 円管内では管壁に平行な層流と, 無秩序な乱流が発生し, レイノルズ数 Re が小さいときは層流が支配的であり, 大きいときは乱流が支配的であるとわかった.

参考文献

- [1] 慶應義塾大学理工学部. 理工学基礎実験, pp. 37–45. 学術図書出版社, 2020.
- [2] 藤田肇. 流体騒音の発生メカニズムと抑制法. ターボ機械, Vol. 23, No. 6, pp. 354–359, 1995.
- [3] 伊藤英覚, 小林陵二. 低乱風洞の設計と性能. 日本機械学会誌, Vol. 89, No. 808, pp. 248–254, 1986.
- [4] 蒔田秀治. 乱流風洞. 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol. 21, No. 5, pp. 409–418, 2002.
- [5] 西華デジタルイメージ. Ldv(laser doppler velocimeter : レーザードップラー流速計) の原理 | 西華デジタルイメージ株式会社. https://www.seika-di.com/media/measurement/combustion/ldv_principle, 11 2018. (Accessed on 07/08/2020).
- [6] 李家賢一. 航空機における渦とその利用. 可視化情報学会誌, Vol. 13, No. 51, pp. 222–227–1, 1993.