

流れの可視化計測（2024 年 S1S2）実験手順

1. 実験装置の構成

本日の実験には図 1 に示す回流水槽を用いる．内部の水はポンプによって時計周りに駆動される．計測部には翼模型が設置されており，回転機構により流れに対する角度（迎角）が変えられる．翼模型に働く揚力，抗力，モーメントをセンサにより計測できる．



図 1 回流水槽

2. 翼模型

使用する翼模型の概形を図 2 に示す．翼型（断面形状）はジューコフスキー翼（翼厚比 0.15，反り比 0.04）である．翼弦長とスパンはそれぞれ $l = 100 \text{ mm}$ ， $b = 198 \text{ mm}$ である．ジューコフスキー翼の詳細に関しては，別に配布する資料を参照のこと．

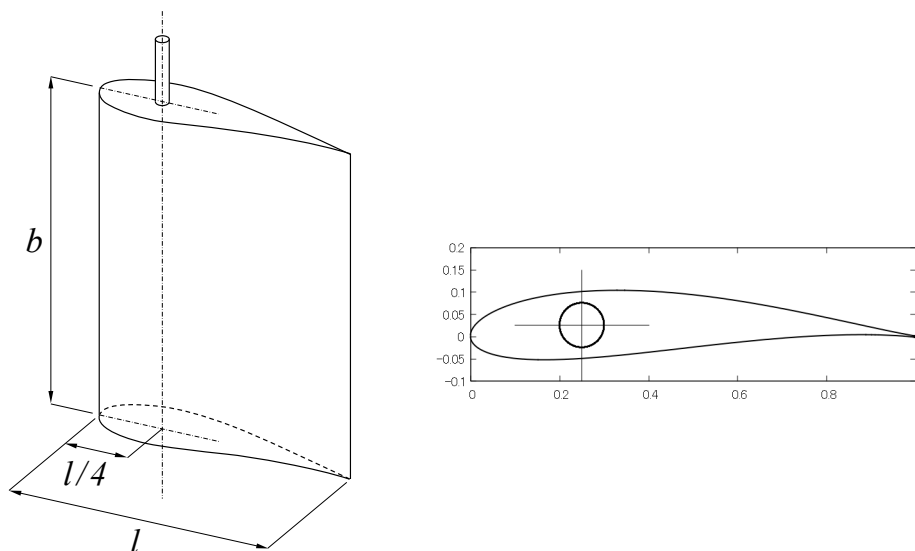


図 2 翼模型

3. 流体の物性値の確認

回流水槽内の水温を計測し、表 1 を参照して水の物性値を求めよ（表に示されていない温度に対しては、線形補間により物性値を推算すること）。水温を計測する際には、ポンプが停止していることを確認してから、温度計を流路内に挿入する。温度を計測し終わったら、温度計は流路内に放置せずに収納ケースに戻すこと。

水温 $T =$ $^{\circ}\text{C}$

密度 $\rho =$ kg/m^3

粘度 $\mu =$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$

表 1 水の物性値（1 気圧における値）

温度 [$^{\circ}\text{C}$]	密度 [kg/m^3]	粘度 [$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$]
0.01	999.84	1791.1
10	999.70	1305.9
20	998.21	1001.6
25	997.05	890.02
30	995.65	797.22
40	992.22	652.73

4. レイノルズ数の確認

代表長さを翼弦長（ $l = 0.1 \text{ m}$ ）、代表速度を主流速度（ $U = 1 \text{ m/s}$ ）としたときの流れのレイノルズ数を計算せよ。

$$\text{Re} = \frac{\rho U l}{\mu} =$$

5. 翼の迎角の調整方法

翼模型は図 3 の回転ステージによって固定されている。流れに対する角度を変更するとき、以下の手順で行う。ステージを破損する恐れがあるので、固定ネジを締めたまま模型を回転させないこと。

1. 固定ネジを緩める
2. 取手をつまんで模型を回転させる。目盛りが 135 度るとき、模型が流れに対して平行な姿勢になる（迎角 $\alpha = 0^{\circ}$ ）

3. 固定ネジを締める

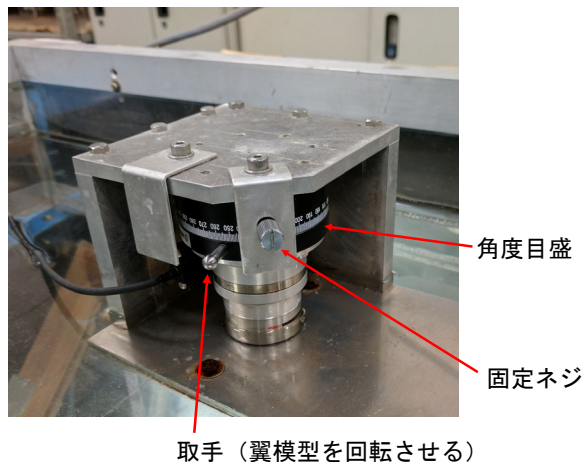


図3 回転ステージ

6. 流速の設定方法

ポンプの ON/OFF および流速の調整は図 4 のインバータ装置によって行う。操作パネルの電源 ON ボタン（緑色のボタン）を押してから、ノブを回して周波数を調整する。パネルに表示される周波数と流速の関係は図 5 の通りである。本日の実験は流速 $u = 1.0 \text{ m/s}$ （インバータ周波数 40 Hz）で行う。流れを止めるときには、周波数を 0 Hz に落としてから電源 OFF ボタン（赤色のボタン）を押す。



図4 インバータ装置

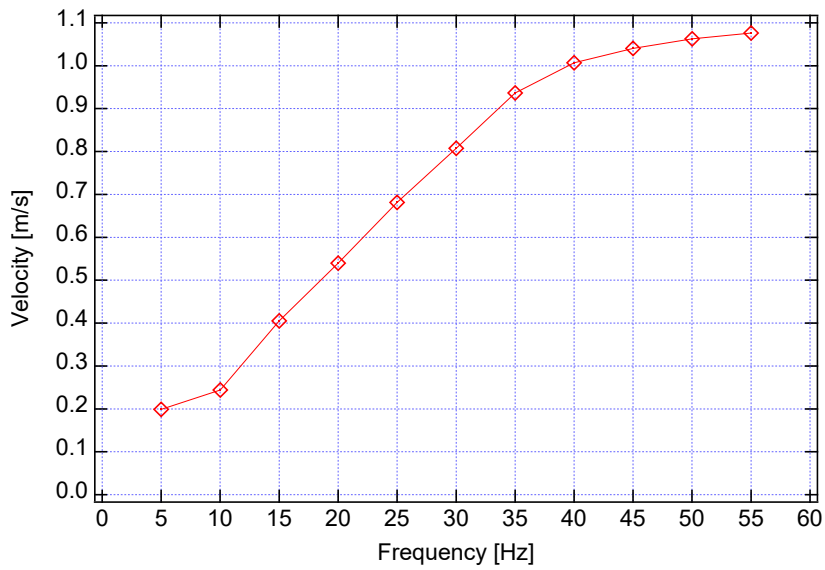


図5 インバータ周波数と流速の関係

7. 力およびモーメントの計測

翼模型に働く力およびモーメント（図 6）は BL AUTOTECH 社製フォーストルクセンサ MINI 4/20 を用いて計測する．センサの電圧出力と力およびモーメントとの間には以下の関係がある．

$$\begin{pmatrix} F_{\parallel} \\ F_{\perp} \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.6553708 & 10.9009006 & 1.8921731 & -5.5049896 & -0.6197659 & -5.4931079 \\ -0.9829920 & -0.1265720 & -0.1077941 & 9.6418442 & 1.1754109 & -9.5219999 \\ -0.0124457 & -0.1341951 & -0.0231777 & -0.1345520 & -0.0174596 & -0.1315755 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta V_1, \dots, \Delta V_6$ はセンサの電圧出力（翼模型に力およびモーメントが働いていないときからの変化量，単位: V）， F_{\parallel}, F_{\perp} は翼弦に平行及び垂直な方向の力の成分（単位: N）， M_z はz軸周りのモーメント（単位: N・m）である．センサの電圧出力は符号（正負）も含めて代入すること．

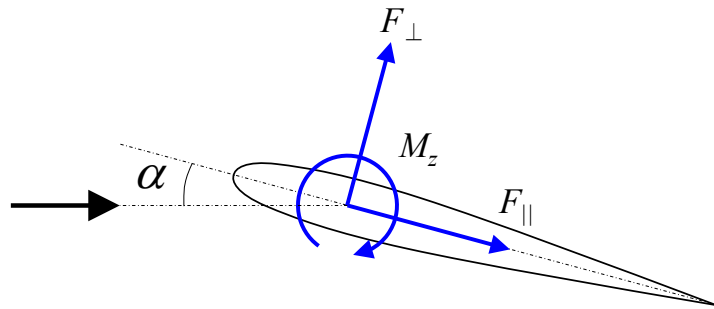


図6 翼に作用する力およびモーメント

センサの電圧出力はデータロガー（図 7）により確認できる。データロガーの液晶画面には、瞬時値と平均値が表示されている。QUIT ボタンを押すと平均値を求めるためのデータの積算がリセットされる。翼模型の迎角を変更した際には、QUIT ボタンを押して平均値をリセットすること。この操作を忘れると、迎角を変更する前のセンサ出力の影響が残ってしまうため、正しい計測結果が得られない。

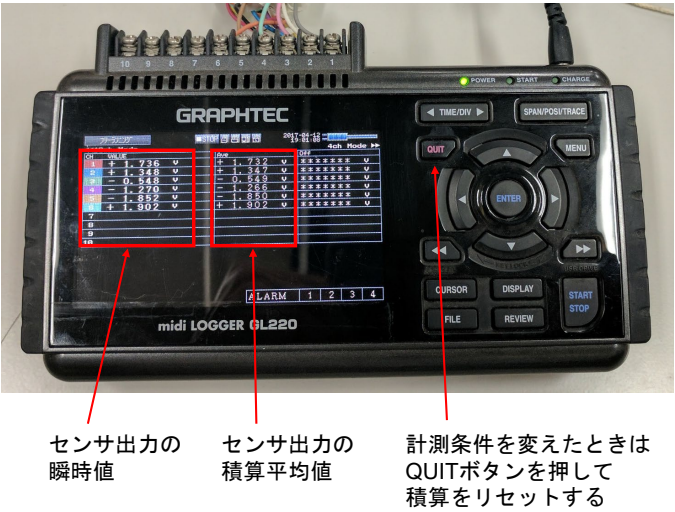


図 7 データロガー

翼の迎角を-10 度から 30 度まで変化させて、力およびモーメントを計測せよ。計測された力 F_{\parallel} , F_{\perp} から、以下の関係式を用いて揚力 L および抗力 D を求める。

$$L = \quad (2)$$

$$D = \quad (3)$$

計測結果から揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D 、モーメント係数 C_M を計算せよ。また、これらの係数が迎角に対してどのように変化するか、グラフにプロットして確認せよ。

$$C_L =$$

$$C_D =$$

$$C_M =$$

これらの式に現れる翼面積 S は、図 2 に示した翼弦長 l とスパン（奥行方向の長さ） b の積で定義される。

$$S = l \cdot b$$

8. 流れの可視化

迎角を変化させたときの翼周りの流れの様子を可視化するために、直径 180–200 μm 程度のナイロン粒子を流体に混入してある。ハロゲンランプからの光をスリットを通して流路に導入することで、二次元断面内の流体の運動（流跡）が可視化できる。ハロゲンランプは非常に輝度が高いので直視しないこと。また、高温になっているので注意すること。

迎角を変えたときの流れの様子について、以下の点に着目して観察せよ。

- ・ 翼の上面を流れる流体と、翼の下面を流れる流体の境界はどこにあるか。ちょうど境界に存在する流体はどのような運動をしているか（翼表面のどの位置にぶつかるか）。
- ・ 流体は翼表面に沿って流れているか？ それとも翼表面から離れてしまうか？ 流れが剥離する位置はどこか？ 流れが再び物体に沿うことはないか？
- ・ 流れが剥離したときに発生する渦構造について。渦の大きさは？ 回転の向きは？
- ・ 流れは時間とともに変化するか？ それとも一定か？

まずは肉眼でよく観察すること。その後で、カメラで流れの様子を撮影する。カメラは三脚に固定する。カメラの設定は、とりあえず撮るのであれば以下のようにする。設定を色々と変更して、どのような画像が撮れるか試してみると良い。

撮影モード	マニュアル
フォーカスモード	マニュアル（レンズのフォーカスリングでピントを合わせる）
焦点距離（ズーム）	55 mm
シャッタースピード	1/15 s
絞り	F36
ISO	1250

図 8 を参照して、流脈（streak line）、流跡（path line）、流線（stream line）の違いを理解せよ。カメラで撮影した画像は 3 つのうちのいずれに対応しているか考えよ。

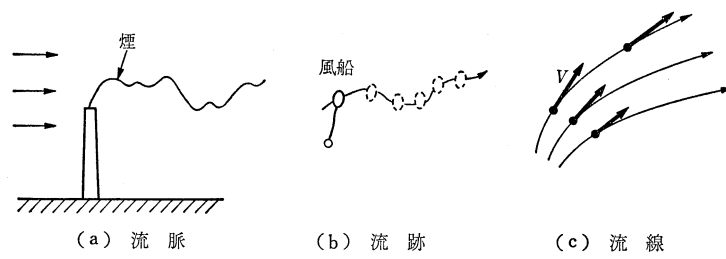


図8 流れを表す線〔大橋秀雄『流体力学(1)』コロナ社 (1982)より引用〕

9. 流れの構造と翼に働く力・モーメントとの関係

流れの様子と翼に働く力・モーメントの関係について，特に迎角に対する依存性に注意して考察せよ．