

◆はじめに◆

この資料は大阪公立大学工学部海洋システム工学科の学生実験の流体基礎実験の参考資料である。我々は様々な場面で流体の流速を計測する。例えば実験室において流れの中で模型の抵抗を調べたりする場合、どのような流速下に設置されているかを知る必要がある。稼働する風車の上でも風速は測られている。飛行機も飛行中の速度を測っている。本基礎実験において、回流水槽で一様流を作り出し、その流速を数種の流速測定機器で計測する。機器の違いによる流速の違いや、機器の特性について知り、考察することを目的とする。本資料では、流体基礎実験で用いる機器の理解のために必要な圧力の測定方法や、流速の測定方法について纏める。

◆圧力の測定◆

圧力の測定は主にひずみ式、液柱式等が挙げられる。

ひずみ式は例えば弾性膜をセンサー部として用いて、これにひずみゲージを貼り付けることによって圧力を一度電圧へと変換する方式のことを指す。図 1 に水压を測定する圧力センサーを示す。この場合、センサー部は合成ゴムで、合成ゴムが変形するとひずみゲージにより変形を読み取る仕組みである。ひずみゲージの原理やその使い方について下のコラムを参照してほしい。ひずみゲージを用いた手法の場合、電圧に対する校正 (calibration) を行うことにより圧力を逆算することとなる。

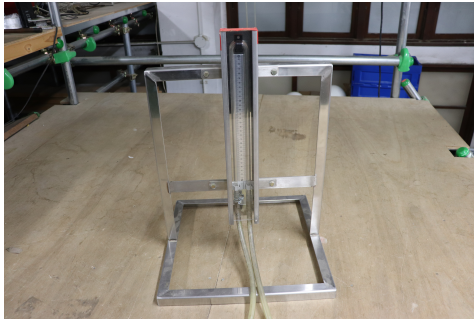


図 1: ひずみ式圧力計 (Marine Hydro. Lab. 所有)

液柱式の圧力測定器はマノメータとも呼ばれる。マノメータ内には水やエタノール等を入れて液柱の差を読み取ることにより圧力に換算する仕組みである。図 2(a) に直立式の U 字管マノメータを、(b) に 30° に傾斜している U 字管マノメータを示す。(b) の傾斜式マノメータは直立式のマノメータで十分な液柱高さの差が得られない時に使うと便利である。例えば直立式のマノメータでの液柱差が 2.5 mm である時、30° の傾斜式マノメータでの差はその 2 倍の 5 mm の差が得られるということになる。

図 3 に示すように、直立式マノメータの液柱差が h となる場合、力のつり合いから

$$p_1 - \rho gh = p_2 - \rho' gh \quad (1)$$



(a) 直立式マノメータ (大阪公立大学所有)



(b) 傾斜式マノメータ (大阪公立大学所有)

図 2: マノメータ

となっている。従って圧力差 $p_1 - p_2$ は

$$p_1 - p_2 = (\rho - \rho')gh \quad (2)$$

である。ここで、 ρ 、 ρ' はマノメータに入っている流体の密度であり、 g は重力加速度を表している。

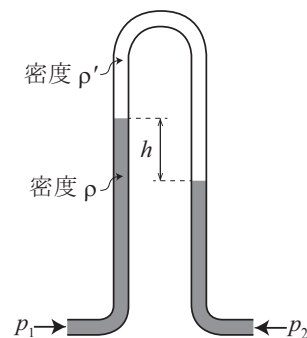


図 3: U 字管マノメータ

◆流速の測定◆

流速の測定も数種類の測定方法がある。[1]

- 速度の種類による分類 (i) 平均値の測定, (ii) 変動成分の測定
- 測定点・測定領域による分類 (i) 1 点あるいは数点における測定, (ii) 全域における測定
- 測定法による分類 (i) トレーサー法, (ii) プローブ法, (iii) 光・音波による測定, (iv) その他
- 流速による分類 (i) 遅い流れ (水 10cm/s 以下, 空気 2m/s 以下) の測定, (ii) 中程度の流れ (水 20cm/s 以上, 空気 2~300m/s) の測定, (iii) 音速を超える流れの測定

海洋工学分野において流速測定がよく行われるが、代表的な事例を挙げたい。

1. プローブ法

- (a) ピトー管 … ピトー管は流れの中に置かれる。ピトー管先端はよどみ点 (流速がゼロ) になっている。よどみ点を過ぎると流体粒子の流速が上がり、側口付近では元の流れの

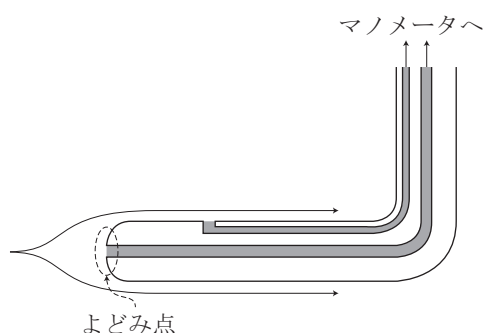
速度に戻っている．この2点の圧力差をマンメータから読み取りピトー管の置かれる流場における圧力を求めることが出来る．流速 (v) はベルヌーイの定理から

$$v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (3)$$

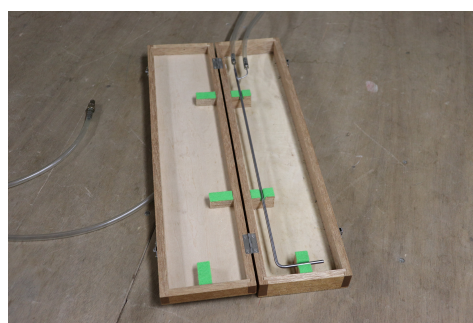
で計算される．ここで、 p_1 はよどみ点での圧力、 p_2 は側口における圧力である． ρ は流体密度である．図3に示すマンメータに接続した際に、液柱差が h になっている場合、流速は

$$v = \sqrt{\frac{2(\rho - \rho')gh}{\rho}} \quad (4)$$

として得られる．回流水槽の流体流速を計測する際には液注が水 ($\rho = 1000$)、液注に封入される流体が空気 ($\rho' = 1.293$) となり、 $\rho - \rho' \approx \rho$ として流速を求めることもある．ピトー管は電気系統を用いずに流速を求めることが可能であり、風洞や水槽における流体流速を測るだけでなく、飛行機にも取り付けられており様々なところで利用されている．



(a) ピトー管周りの流線



(b) ピトー管 (大阪公立大学所有)

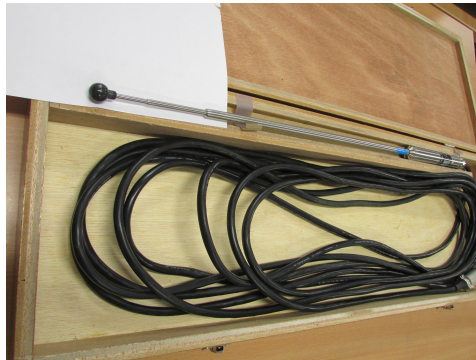


(c) ピトー管の先端部

図4: ピトー管 (Pitot tube)

- (b) 翼車式流速計 … 流れにより翼車が回転し、この翼車の回転数を調べることにより流速を求める計測器である．翼車の回転数と流速の関係は製造メーカーにより予め調べられており、使用者はこの校正値により流速を求めることが出来る．一般的には製造メーカーにより表示器も作られており使用者は直接流速を知ることが出来る．
- (c) 電磁流速計 … 電磁流速計の動作原理は、磁界中を導体が横切る際に電圧が生じるファラデーの電磁誘導の法則を利用している．センサー部に巻かれた電磁コイルが作り出す

磁界を導体である水が横切る時に発生する起電力を計測している。尚、電圧の変化は僅かである為、アンプにより電圧の増幅を行うのが一般的である。図5に電磁流速計のセンサーおよびアンプを示している。電磁流速計は製造メーカーから出されている校正値を使用して流速を算出する。すなわち、得られる電圧の値に対する流速の値が予め調べられており使用者はその値を元に流速を求めるのである。



(a) 電磁流速計のセンサー部 (Marine Hydro. Lab. 所有)

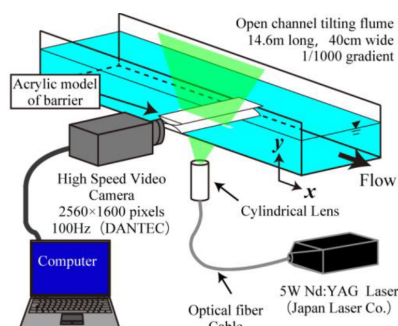


(b) 電磁流速計のアンプ部 (Marine Hydro. Lab. 所有)

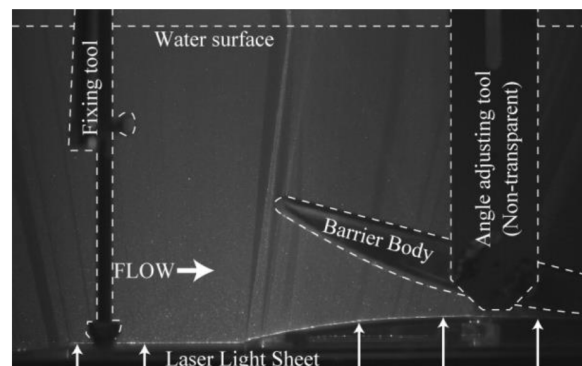
図 5: 電磁流速計

2. トレーサー法

- (a) PIV(Particle Image Velocimetry) … 粒子画像流速測定法 (PIV) はトレーサー粒子にレーザーシートを照射し、トレーサー粒子をカメラで撮影しフレーム間の微小時間 Δt 秒における粒子の変位ベクトル $\Delta \mathbf{x}$ を画像処理により求め、流速ベクトル $\mathbf{v} = \Delta \mathbf{x} / \Delta t$ を算出する方法である。上述のピトー管や翼車式流速計や電磁流速計の様にセンサーを流体に触れさせる必要がない、いわゆる非接触で計測できることが特徴である。また、流れ場の空間的な計測も可能であるのが特徴と言える。図6には東等によって行われた流起式津波防波堤周りの流場を PIV により計測した例を示す [2]。 (a) は実験のセットアップの模式図であり、 (b) はレーザーシートによりトレーサー粒子が見える様子である。



(a) Experimental apparatus

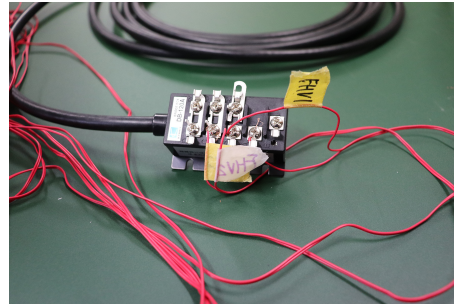
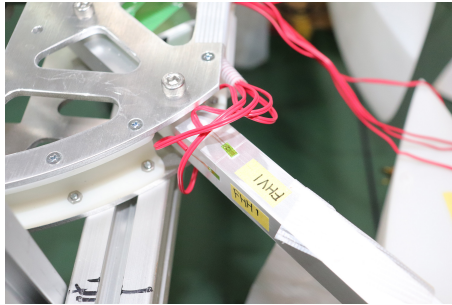


(b) The raw image taken by the high-speed video camera, the case which the barrier body was fixed angle to 15 degrees, Case of High_15

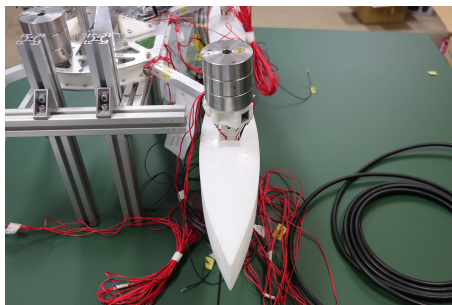
図 6: PIV による流起式津波防波堤周りの流場計測

ひずみゲージ (strain gauge)

材料片に抵抗体を貼り付け、材料が変形したときに抵抗体の抵抗が変化することを利用して材料片のひずみを測ることが出来る。この抵抗体をひずみゲージ (strain gauge) と言う。我々の実に様々なところで利用されている。身近なところと言うと体重計の中にもひずみゲージが入っている。下図左にひずみゲージ (緑色の部分) を示す。このひずみゲージの抵抗変化量は実際には非常に小さい。そこでブリッジ回路を組み、ひずみゲージの抵抗変化が生じた際に変化する微量電圧を増幅する方法でひずみ量を調べる手法が用いられる。下図右がブリッジ回路を組んでいるブリッジボックスである。



ひずみゲージ → ブリッジボックス → アンプという流れで機器は接続される。下図左は四胴型自動航行船の 1/3 模型のハル部上部に質量 1.5kg のおもりを載せた時の様子である。この時、下図右の様に電圧が 1.005V と表示された。波浪中を航行する場合、四胴型自動航行船はアーム部がひずむわけだが、1.005V と表示される際にはおよそ 14.7N の荷重が作用しているということを意味する。おもりを使ってどれくらいの電圧変化が生じるかを予め調べることをキャリブレーション (校正: calibration) という。



さて、波浪中のように時々刻々と電圧が変化する場合はどうしたら良いのだろうか。この場合は、データロガーというものがあり、これによりアンプの電圧を A/D (Analog / Digital) 変換し PC にデータを保存することが可能となる。

この装置を使った実験の様子は



に示されるページで閲覧可能である [3].

レポート作成要領

レポートは手書きとし、以下の内容を必ず含めること。

- 実験テーマ名, 所属, 学籍番号, 氏名, 提出年月日
- 目的
- 原理
- 実験方法
- 実験結果
- 考察
- まとめ
- 参考文献

提出期限 … 実験を行った週の次の日曜日の 23 時 55 分 (厳守)

提出場所 … 授業支援システム内, 海洋システム工学科学生実験 基礎実験 — 流体力学編より提出

参考文献

- [1] 社団法人日本流体力学会. 第 2 版 流体力学ハンドブック. 第 2 版. 丸善株式会社, 1998.
- [2] Ryoukei Azuma, Tadao Ito, Hideaki Handa, Tetsuya Hiraishi, and Takahiro Sugano. Standing-up mechanism of hydroplane tsunami barrier by using piv analysis. the 38th IAHR World Congress, 2019. doi:10.3850/38WC092019-0778.
- [3] 二瓶泰範. 2021 年 ロボセンアームに生じる波浪荷重試験. Technical report, Marine Hydrodynamics Laboratory, 大阪府立大学, 2021. <http://hydrodynamics.marine.osakafu-u.ac.jp/MEMORY/2021ROBOSENARM.html>.