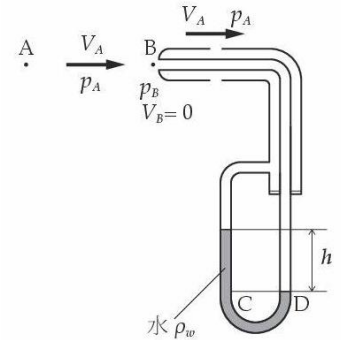


### 31 揚力 (ベルヌーイの定理)

#### 【問題 31】ピトー管

大学課程問題

右図は航空機の速さの測定に使われるピトー管と言われる装置である。周囲の大気圧  $p_A$  (静圧) に対し、航空機が飛行しているとき、大気との相対速度  $V_A$  によって入り口 B 点の圧力  $p_B$  は高くなる (動圧)。大気の密度を  $\rho$ 、水の密度を  $\rho_w$  とするとき、流体の 2 点 A, B において、ベルヌーイの定理



$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{一定}$$

大気に対する航空機の相対速度  $V_A$  を  $\rho$ ,  $\rho_w$ ,  $h$ , 重力加速度  $g$  を用いて表せ。

#### 【解答】

大気圧  $p_A$  は U 字管の C 側に上部液面を押し、動圧  $p_B$  が液面 D を押ししている。パスカルの原理より、

$$p_B = p_A + \rho_w gh \quad \dots \textcircled{1}$$

位置エネルギーの基準を D 点にとって、ベルヌーイの定理を適用すると

$$p_B = \frac{1}{2}\rho V_A^2 + p_A \quad \dots \textcircled{2}$$

$$\textcircled{1} \textcircled{2} \text{より} \quad \frac{1}{2}\rho V_A^2 = p_B - p_A = \rho_w gh \quad \therefore V_A = \sqrt{\frac{2\rho_w gh}{\rho}}$$

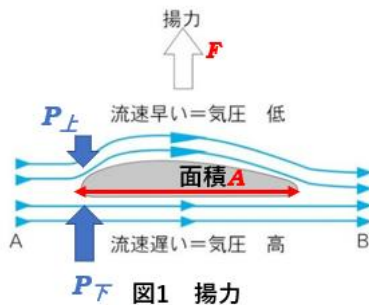
#### 【検証実験】航空機の揚力

##### 1 実験装置

##### (1) 理論

##### 揚力

飛行機が一定速度で水平飛行するとき、前方からくる空気の流れは、一定の流れであるが、翼で  $v_{上}$ ,  $v_{下}$  に分かれる。翼の断面



は上側に反っているため、上部で流速が速く、下部では遅くなる。ベルヌーイの定理により、 $\textcircled{1}$  が成り立つ。

$$P_{上} + \frac{1}{2}\rho v_{上}^2 = P_{下} + \frac{1}{2}\rho v_{下}^2 \quad \dots \textcircled{1}$$

翼面積を  $A$  とすると、翼の上面と下面の圧力差によって受ける力が揚力  $F$  となるので、

$$F = (P_{下} - P_{上}) A = \frac{1}{2}\rho A (v_{下}^2 - v_{上}^2)$$

$v_{上}$ ,  $v_{下}$  ともに速度に比例するので、 $v_{下}^2 - v_{上}^2 = Cv^2$  とでき、揚力は

$$F = (P_{下} - P_{上}) A = \frac{1}{2}\rho A C v^2 \quad \dots \textcircled{2}$$

と表される。C は翼の形状に関する定数である。

##### (2) 装置の作成

準備物	品名	規格	個数	備考
精密はかり	MS-50	0~50 g	1	CUSTOM
サーキュレーター	DCサーキュレーター	6段階送風	1	ドウシシャ
風速計	ANEMOMETER		1	RoHS
クリップ		台付き	1	100円ショップ
模型飛行機	スチレン	翼型の異なるもの	3	ツバメ玩具製作所
その他	両面テープ			

表 1 の部品を準備する。実験は 2 種類行い、まず、6 段階風速のサーキュレーターの各段階の風速を測定する。次に、風速を変えて 3 種類の飛行機の模型の揚力を測定する。

##### 2 実験方法

##### (1) サーキュレーターの風速測定

サーキュレーターから一定の距離  $L=20\text{cm}$  の位置に風速計を置きサーキュレーターの各段階の風速を調べる。



図2 風速測定

## (2) 揚力の測定

- ① 台付きクリップに模型飛行機の下部をクリップで挟んで精密はかり上に載せる。このとき、飛行機の翼の位置は、風速を測定した位置に合わせて合わせる。翼はできるだけ水平に置く。
- ② 風を当てないときの重さ ( $W$ ) を測定する。
- ③ 風を当てて精密

はかりの目盛り ( $W'$ ) を読み取り、

$$F = W - W' \quad \dots \textcircled{3}$$

を揚力とする。



図3 実験装置



図4 翼サンプル

## 3 実験結果

### (1) サーキュレーター風の風速

サーキュレーターの6段階の風速はグラフ1、その値は表2のようになった。

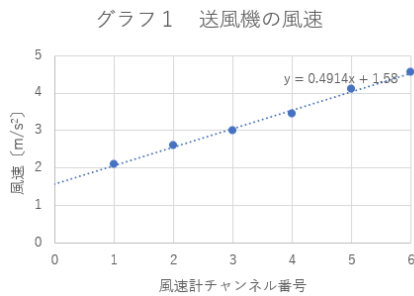
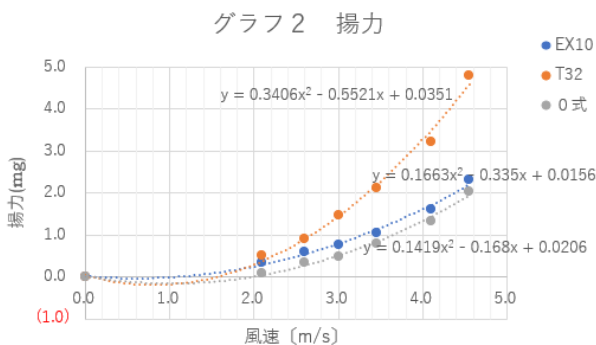


表2 測定データ 揚力(mgw)

風速(m/s)	模型飛行機の種類		
	EX10	T32	0式
0.00	0	0	0
2.10	0.357	0.511	0.083
2.60	0.607	0.911	0.333
3.00	0.757	1.461	0.483
3.45	1.057	2.111	0.783
4.10	1.607	3.211	1.333
4.55	2.307	4.811	2.033

### (2) 揚力

表2は③式に基づいて実験結果をまとめたものである。グラフ2は横軸に風速を、縦軸に揚力をとって表したものである。



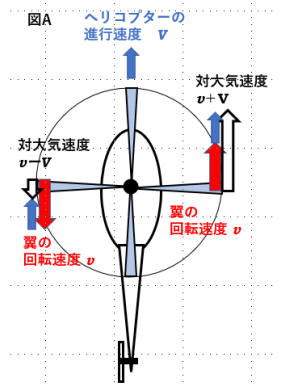
また、近似曲線は②式に基づいて2次関数をマッチさせた。

## 4 授業への活用

揚力の理論式(②式)は、風速の2乗に比例することを表している。3種類の模型飛行機のサンプルは、それぞれが2次関数に当てはまることから、揚力の式は検証できたと言える。ただし、比例定数  $A$ 、 $C$  の部分は3種類の型式の違いだけでなく、置き方による誤差も含まれると思われる。

### 【参考】回転翼をもつ航空機への考察

ヘリコプターは回転翼で揚力を作り出している。図Aのような回転翼は速さ  $v$  で等速円運動をしていても、ヘリコプターが速度  $V$  で飛行していると回転翼の対大気速度(合成速度)が異なってくる。そのため、ヘリコプターは進行方向に対して右側と左側の揚力が異なる。このアンバランスを修正するため、回転翼の角度を半周期ごとに変えるという高度な機構を備えている。



図Bは玩具のヘリコプターの羽をモーターで回転させ、モーターに軸をつけて回転できる軸受けをつけて左右の揚力のバランスを観察できるようにしている実験装置である。この装置に前方からサーキュレーターで風を当てるとわずかながらバランスが異なる(②は右上がり)ことがわかる(図B-(1),(2))。



大型ヘリコプターは、ローターを2個備えている機種があるが、このような場合回転翼の回転方向を反対向きに取っている。これは、揚力のアンバランスを修正するためである(図C)。また、小型のドローンは4ローターが多い。ローターを増やして翼の角度を変えなくても安定させている。

