

# 台灣二〇〇二年國際科學展覽會

科 別：物理科

作品名稱：關於渦旋

得獎獎項：物理科佳作

學 校：臺北市私立再興高級中學

作 者：王啓倫

# Abstract

A professor once told me that scientists have already known a lot about vortices , but less about how to tackle with them in here and there cases . As to my mind , this means knowing by halves . As a matter of fact , I gradually found that human may not know more than a dragonfly !

A dragonfly flying in a figure of eight pattern does know about Vortices Recycling . The highlight of the experiment is the hovering ability upon a fixed point in the air . Who can stay longer will be the king of Vortices .

Sometimes I am not so optimistic about mimicking a fly or a bat , but I am really very interesting in discovering which flying mechanism is more effective , 『 Fling Mechanism 』 or 『 In a figure of eight pattern 』 , if with the same weight and energy ? How to implement their mechanism in our flying machines ?

It is always the best policy to do naturally with vortices . The conservation of vorticity is found here and there . Vortex itself is energetic . To gain means to keep .

The one who is able to keep vortices will be rewarded ° As in lift generation and the ability of hovering , the rule follows .

Typhoons and tornados still threat us like the beasts ° And what's more , a jumbo-airplane was crashed as beaten by tip vortices of the former airplane ° As the dragonflies , the beautiful acrobats of vortices , infuse in tip vortices ° Not the strong contradistinction did we realize that it is time for vortices !

2002 年台灣國際科學展覽會研究報告

# ABOUT VORTICES

Beauty or Beast?

Beauty and Beast!

# 作品摘要

研究渦旋已經四年。四年之中，涉獵了許多關於渦旋的實驗。當我越了解渦旋，就越佩服那些卓越的昆蟲朋友們，它們可說是調配利用渦旋的大師。

從候鳥遷徙的 V 字型隊伍、海豚的渦旋氣球、到蜻蜓八字型的飛行機制，我很想知道：在一個固定的流場中，到底哪一種運動機制，能最有效率的提供上升的力量？

而如何將昆蟲朋友們的高超技術，運用到人類飛行載具上？將是我有興趣的另一項課題。

『關於渦旋』是一系列渦旋實驗，目的就是自基礎開始深入了解在地球這樣環境下渦旋的性質。

- (一) 探討基礎的渦旋本質
- (二) 產生相對運動下物體的渦旋結構
- (三) 物體取得升力與失去升力的要件
- (四) 昆蟲飛行機制探密
- (五) 未來展望與渦旋的應用

經過長時間的觀察可以了解到：

1、 渦旋遵守動量守恆。  
是以渦旋出現時是成對的。

2、 渦旋是具有能量的。  
在上升力取得方面，當攻角過大時，渦旋剝離，造成能量的損失；以至於飛行載具失速。而蜻蜓是保有渦旋並加以利用的高手，自然事半功倍。

順勢而為，渦旋增強。

# 關於渦旋



- 一、前言
- 二、基礎篇~初見渦旋
- 三、探討運動物體的渦旋結構
- 四、乘著歌聲的翅膀
- 五、渦旋大師
- 六、結論與應用

# 2002 年台灣國際科學展覽會研究報告

## 一、前言

### 【研究動機】

第一次發現渦旋，是四年前的夏天，它給我第一個印象是：水中的龍捲風。我興致高昂的計劃做一個漂亮的渦旋。四年之中，涉獵了許多關於渦旋的實驗。當我越了解渦旋，就越佩服那些卓越的昆蟲朋友們，它們可說是調配利用渦旋的大師。

從候鳥遷徙的 V 字型隊伍、海豚的渦旋氣球、到蜻蜓八字型的飛行機制，我很想知道：在一個固定的流場中，到底哪一種運動機制，能最有效率的提供上升的力量？能上升，意味著寬廣的活動空間。開疆闢土，就從最小的渦旋開始吧！

### 【研究目的】

- (一) 探討基礎的渦旋本質
- (二) 產生相對運動下物體的渦旋結構
- (三) 物體取得升力與失去升力的要件
- (四) 昆蟲飛行機制探密
- (五) 未來展望與渦旋的應用



2002 年台灣國際科學展覽會研究報告

研究方法或過程

研究結果與討論

# 2002 年台灣國際科學展覽會研究報告

## 第一單元

# 初 見 渦 旋

# 第一單元

## 剖析渦旋：水渦與空氣蕊

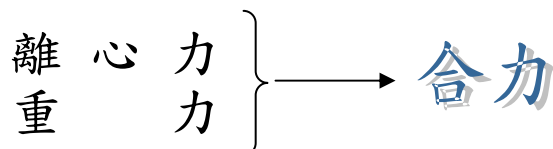
### 觀察渦旋與邊際環境

### 觀察渦旋的加成

本文中提到的渦旋是指【水渦＋空氣蕊】

## § 第一節

### 1、『水渦』的形成



因為液面與此合力垂直，  
所以形成“水渦”（dimple）。

### 2、空氣蕊（air core）

在本文中是指水渦形成後，  
如遇低壓中心，空氣柱向下帶，  
直到接觸底面的深度。

### 3、實驗設備

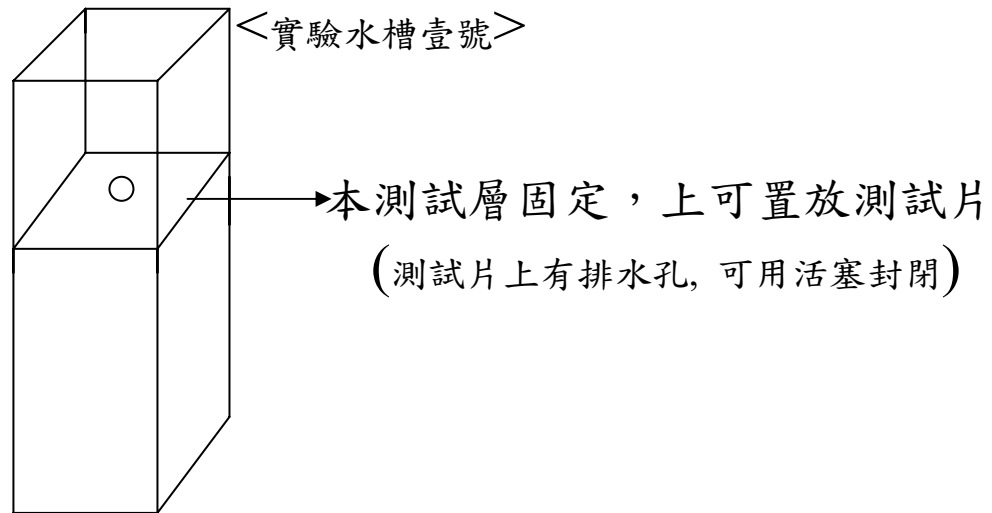
◇8cm x 8cm x 20cm  
雙層立體水槽（小）

◇10cm x 10cm x 35cm  
三層立體水槽（中）  
42 片各式 出水孔

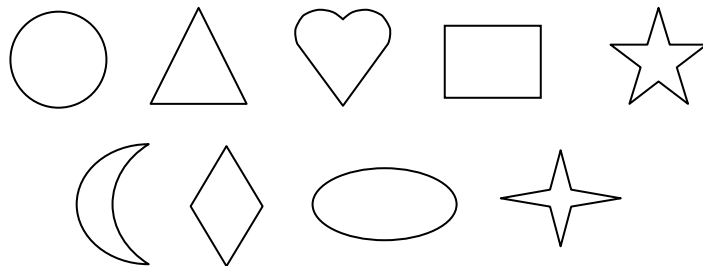
◇50cm x 50cm x 80cm  
三層立體水槽（大）

## § 第二節

### { 實驗水槽中的渦旋 }



#### 各種不同形狀排水孔的測試片

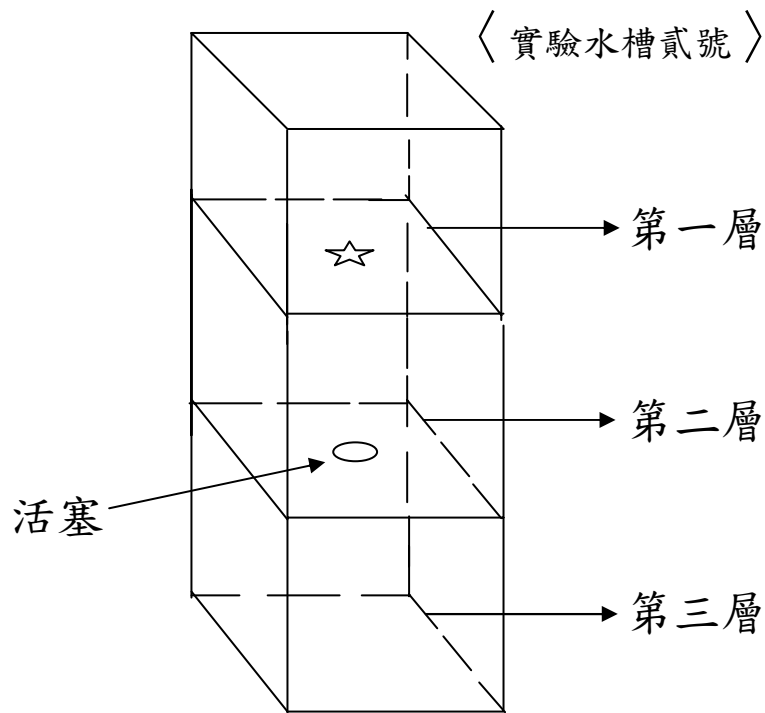


- (1) 將活塞封閉排水口，注入清水。
- (2) 用筷子攪動。觀察：筷子的數目遞增,渦旋如何？
- (3) 當攪動方式除了繞圈子外，  
直線來回式及隨意均可嘗試。  
攪動方式的不同對渦旋有影響嗎？
- (4) 攪動計時十秒後，拉下活塞，排水。
- (5) 觀察渦旋。攪動方式的不同：繞圈/直線/隨意  
攪動快/攪動慢，速度不同；觀察渦旋是否受到影響。
- (6) 平日各式儲水裝置的排水孔全是圓形，  
當排水孔不再是圓形時，渦旋是否有變化？

## § 第三節

### { 空氣蕊的實驗 }

#### 1、測試不同形狀的排水孔



- (1) 使用實驗水槽貳號
- (2) 注滿清水，放入各型排水孔的測試片。
- (3) 取用長竹筷一雙，開始攪動。
- (4) 順時針與逆時針各試驗一次。
- (5) 攪動快與攪動慢各試一次。
- (6) 攪動十秒後，抽出竹筷。
- (7) 仔細觀察：
  - dimple <水 渦> 的產生
  - air core <空氣蕊> 的產生
- (8) 記錄空氣蕊產生的高度。
- (9) 記錄空氣蕊接觸排水口的高度。

## § 第四節

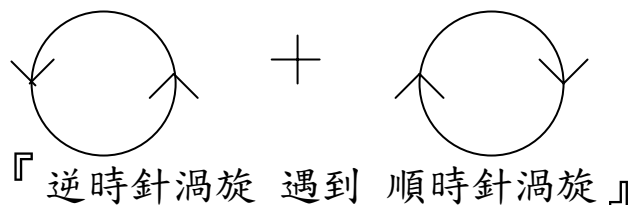
### { 渦旋與其邊際環境 }

- (1) 市售礦泉水，瓶身有各式各樣的花紋、當渦旋在其中衍生，不知是否會受到影響？
- (2) 直接拿半瓶礦泉水，用手擲甩觀察瓶中的渦旋。
- (3) 選取各式各樣礦泉水瓶身，截取中央花紋一段：
  - 直線瓶
  - 圓圈瓶
  - 波浪瓶
  - 點突瓶將截取後的瓶身置於(實驗水槽壹號)，將活塞封閉排水口，注入清水。
- (4) 攪動十秒後，拉下活塞。
- (5) 觀察渦旋通過不同的瓶身
- (6) 記錄空氣蕊產生的高度。

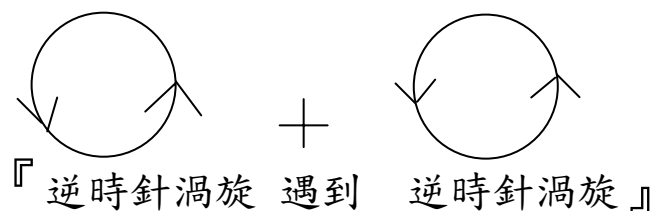
## § 第五節

### { 當渦旋與渦旋相遇時 }

#### 1、當反向渦旋相遇時



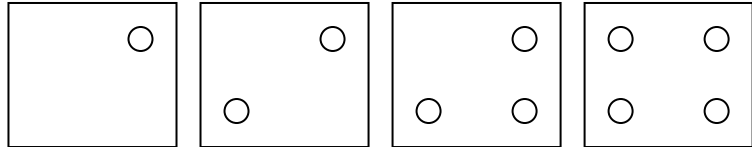
#### 2、當同向渦旋相遇時



## § 第六節

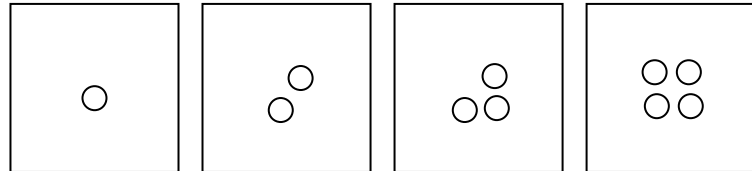
### { 渦旋的組合 }

#### 1. ◇測試

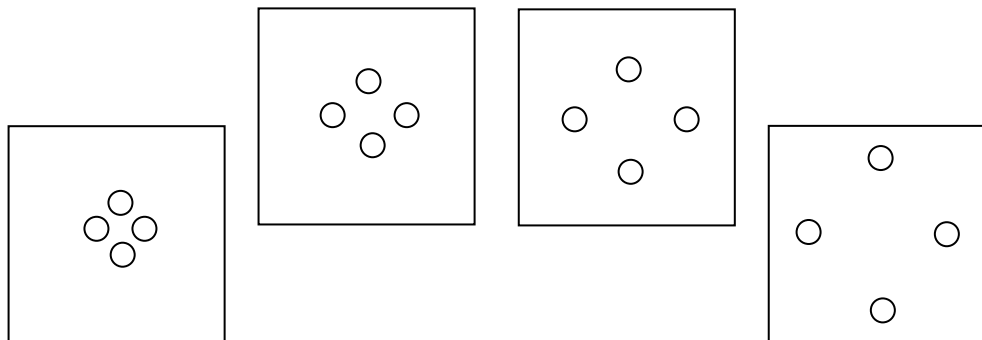


當圓形排水口逐片遞增，  
衍生的渦旋組合會有變化嗎？

#### ◇測試



當圓形排水口向中央聚集且逐片遞增，衍生的渦旋組合？



當圓形排水口之間的距離改變，渦旋組合會有變化嗎？

## § 第七節

### { 空氣蕊實驗結果 }

排水口形狀/面積  
(平方公分)

空氣蕊深度(cm)



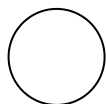
1.69

9 面積最大，空氣蕊最長



0.875

3



1.375

6



0.5

2 面積小/流速慢；水渦成型早/空氣蕊短



0.875

5



1.25

7



0.8

3



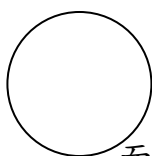
1.375

6



0.5

2 面積最小/流速慢/水渦成型早/空氣蕊最短



半徑 1.5cm  
面積約 7.0 平方公分


3 流速快，渦旋粗，空氣蕊短



## § 第八節

### { 實驗結果與討論 }

#### (一) 渦旋中心氣壓比外部氣壓低

在實驗中,當測試片  放入水槽架上，並注入清水，起先水並不會流下；當我們開始繞圈子攪動，水渦形成。同時氣泡旺盛的自洞口下向上冒出。

『這實驗證明了渦旋中心壓力較低。』

而轉動越快，氣泡越多，空氣柱越粗，中心壓力越低。

#### (二) 實驗中所有的攪動如非繞圓圈，

渦旋無法產生。

在實驗中嘗試了三種攪動方式：直線來回，繞圓圈，隨意。其中只有繞圓圈能產生渦旋。渦旋的橫切面是圓圈，所以渦旋的產生應與圓有密切關係。

#### (三) 空氣蕊的產生得自旋轉的能量，

必須克服水的浮力。

如果不加以繞圈攪動，無法觀察到渦旋。旋轉的能量使渦旋容易產生。在實驗水槽中，由於水量不太多，很多時候，渦旋並不是一氣呵成；很容易退縮。所以有水渦，不代表有空氣蕊；而有空氣蕊，不一定能看到空氣蕊碰觸底面。往往空氣蕊伸長後，又縮上去，而水渦有時只是旋轉的氣泡。

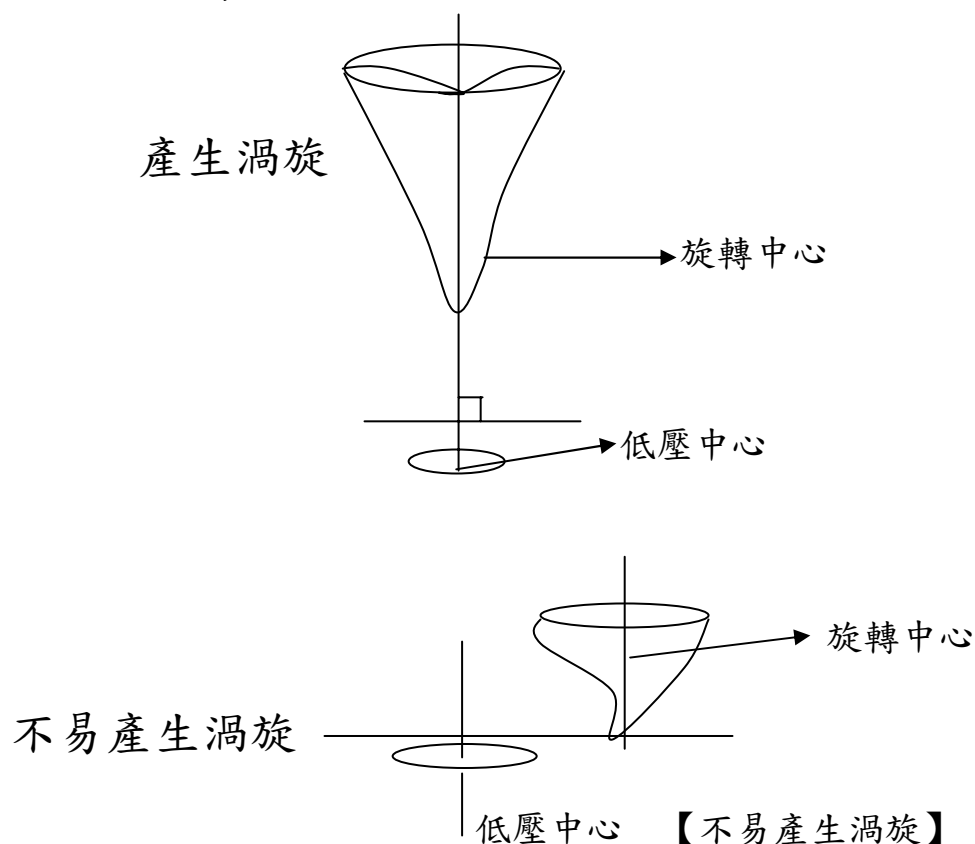
(四) 攪動快，容易得到渦旋及較長的空氣蕊。

攪動快，旋轉能量大，渦旋容易產生；且空氣蕊較易克服浮力。

## § 第九節





### { 第一單元 - 水渦實驗 結論 }

(一) 渦旋的旋轉中心與低壓區中心所組成的直線若無法垂直水平線，則渦旋不易產生。



(二) 排水口形狀對渦旋沒有太大影響，但是排水口面積影響空氣蕊長短、(深度)及粗細。

排水口面積大，水流速度快，渦旋一氣呵成。

1. 由實驗發現  形狀的排水口與  當面積一樣時，空氣蕊等長。也可以說水流通過這兩種形狀時，能量的耗損是幾乎相同的。
2.  這形狀，當面積與圓形相同時其空氣蕊卻是較長，表示水流通過  型的排水口時，能量耗損較少。

(三) 順勢而為，渦旋增強。

從實驗中，可以發現：由於渦旋是由圓圈所組成，所以繞圓圈攪動，渦旋順勢增強。在邊際環境中，也以圓圈形環境對渦旋最有利 !!

※ 台灣這兩年遇到「寶發颱風＋桑美颱風」、「納莉颱風＋丹娜絲颱風」的雙颱效應。也就是實驗中『當渦旋遇到渦旋』的更複雜的情況。

# 2002 年台灣國際科學展覽會研究報告

## 第二單元

# 能 量 與 渦 旋

## 第二單元【探討運動物體的渦旋結構】

### 觀察運動體之後緣端渦旋

Tip Vortices

(運動物體與流體之夾角)

### 形與流之觀察 (運動體的形狀與渦旋結構)

Induced Drag

### 速度與渦旋結構

### 渦旋與能量

## § 第一節

1. 後緣端渦旋 (Tip Vortices)：當物體與流體做相對運動時，物體後緣兩端所產生的渦旋。

是否所有物體在運動時都會產生渦旋？

原則上只要擁有角動量，就可以產生渦旋。很多渦旋肉眼看不到。像是昆蟲煽動翅膀，汽車行進時，人在運動時.....都會產生渦旋。在實驗中 可以看到石頭自斜坡滾落水中，石頭後側的渦旋清晰可見。

2. 當物體與流體做相對運動時，所遭受的阻力有：

＊體表摩擦力

＊流體阻力

＊渦旋阻力 (Induced Drag)

3. 渦旋強度：渦旋半徑 $\times$  沿渦旋圓周之切線速率  
當切線速率相同時，渦旋強度與渦旋半徑成正比。

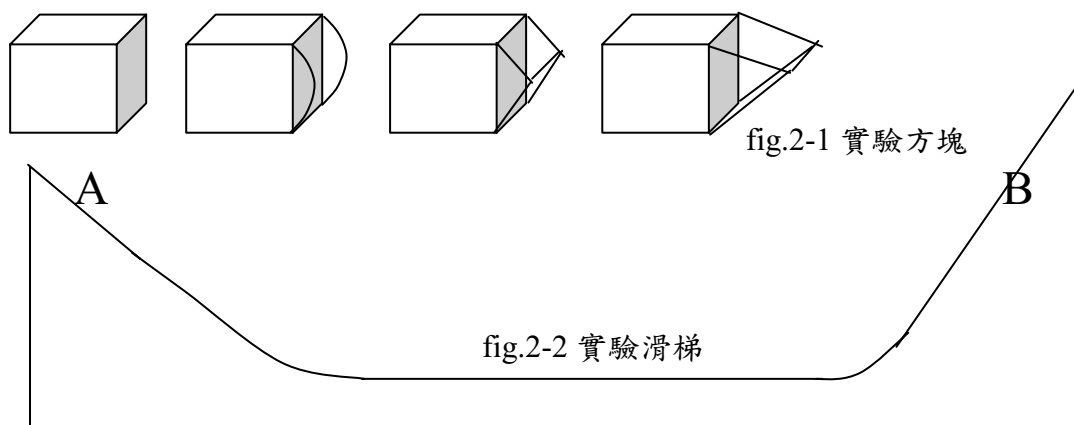
## § 第二節

### { 物體與流體相對運動時 }

- (1) 將各式不同的物體自斜面釋放滑行入水中。  
觀察物體周圍的水流變化。
- (2) 將清水注入裝有若干洗衣粉之面盆中。  
或將牛奶注入咖啡杯中。  
觀察流線之變化。
- (3) 取圓盤、鈍體四方物（鉛板）、壓克力矩形薄片  
插入等速行進之流體中，觀察流線變化。
- (4) 以與流體不同的夾角，重複步驟（3）
- (5) 記錄夾角與渦旋半徑。

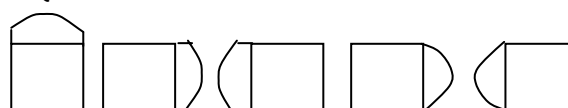
## § 第三節

### { 形與流的實驗 }



1. 將實驗方塊（圖 2-1）依序自實驗滑梯（圖 2-2）上滑下。
2. 滑梯 A 端斜面角度  $45^\circ$ 、B 端  $60^\circ$  分別測試。
3. 實驗方塊中除了正立方，其他方塊皆有五面平滑面  
分別以此五平滑面測試。

以橢圓方塊為例：



記錄滑行距離。

◆ 所有實驗方塊均等重且每一平滑面與滑梯的接觸面積相同。

## § 第四節

### { 形與流的實驗 }

- (1) 取質量完全相同但造型完全不同的小汽車。
- (2) 自實驗滑梯上以不同之高度釋放、滑下。
- (3) 記錄每一高度時的冠軍[最先到達終點線者]

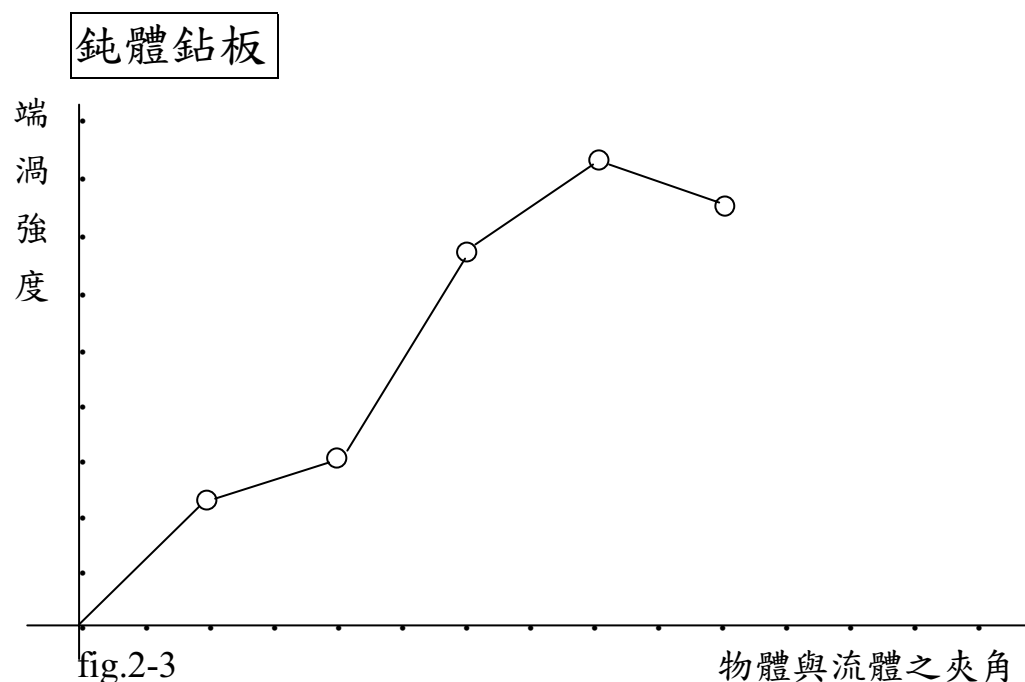
## § 第五節

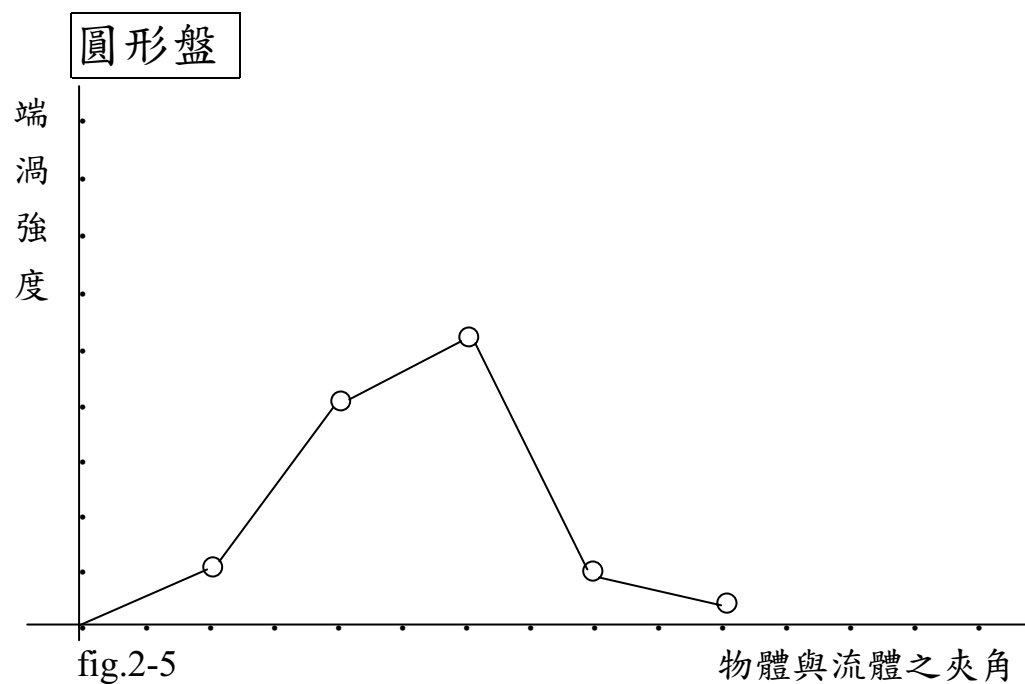
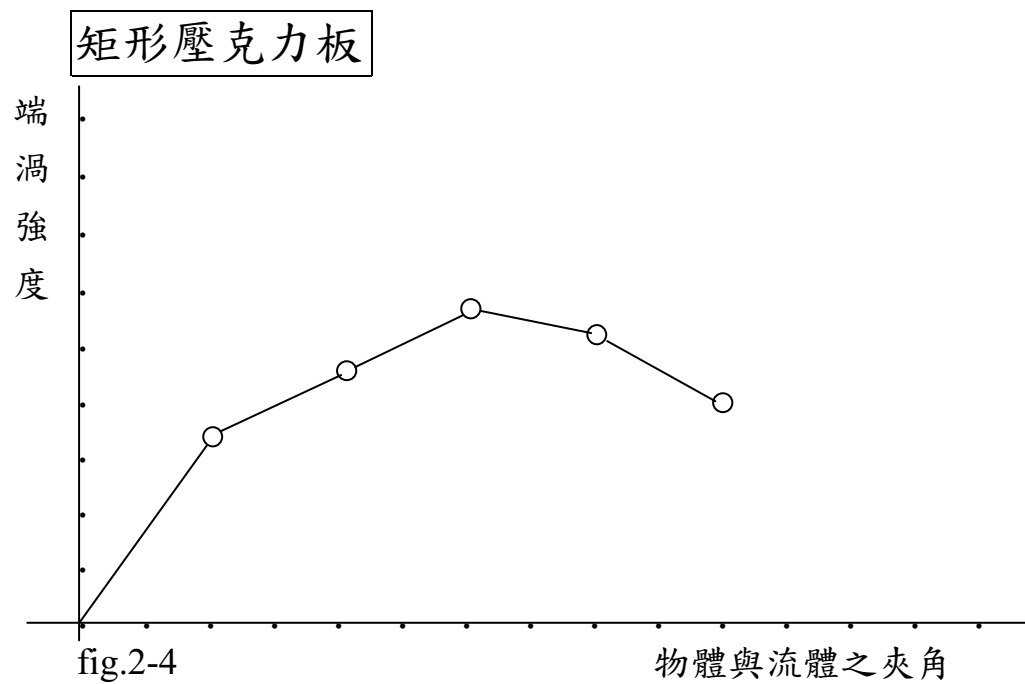
### { 實驗結果與討論 }

- (1) 當物體與周圍流體產生相對運動時，在物體後方兩端點會產生渦旋（Tip Vortices）。
- (2) 物體在運動時，接觸面積的大小，會影響渦旋的強度嗎？

由實驗結果得知：運動體與流體的接觸面積不會影響後緣端渦的強度，但是截面較長的物體它的左右兩側端渦間隔較大。

- (3) 運動體與流體的夾角影響後緣端渦旋的強度





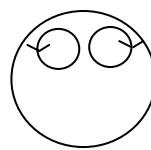
渦旋的強度＝渦旋的圓周× 切線速度

由於實驗水槽控制切線速度相同;是以在此實驗中以渦旋半徑代表渦旋強度

★由實驗可知：當物體與流體產生相對運動時，在夾角  $90^\circ$ ，有最強的后側端渦（Tip Vortices）。



- (4) 當牛奶注入咖啡杯中，流線呈現渦旋大小相同，方向相反。



(Conservation of Vorticity)

※瀑布自上宣洩而下，其下水潭岩壁邊常見到渦旋，即是相同的現象。

- (5) 在先前的實驗中，我們了解到任何物體與周邊流體產生相對運動時，在物體後端兩側會產生端渦 (Tip Vortices)。由於端渦會自物體帶走能量，實為阻力 (Tip Vortices)。

(6) 形與流的第一組實驗中，最重要的發現：  
在這次實驗中用到的立體方塊：前緣 (Front Part) 與後緣 (Rear part) 設計為不同的形狀，但是與實驗滑梯的所有可能接觸面均設計為相同面積。  
這種方式是實驗『物體之幾何形狀 vs. 運動時的渦旋結構』的最佳方式：因為是『同一個物體』且『同一接觸面』，所以重量、體積、摩擦力、物體表面阻力，均為相同；若初始動能相同，則唯一的操縱變因只有隨流線變化的渦旋結構了。  
在這個實驗中，顯示出『物體的幾何形狀會影響相對運動中物體周圍的渦旋結構』。由於渦旋結構產生渦旋阻力 (Induced Drag)。所以形狀上的設計確實可以減低渦旋阻力。

※在形與流的實驗中，動能的測量：

以滑行的距離或是爬坡的高度作為基準。

※實驗時，每一運動體都在相同的高度釋放，  
也就是初始能量維持相同。

### (7) 形與流的第二組實驗：

這次實驗用的小汽車，重量完全相同。在不同的高度釋放，有不同的冠軍。

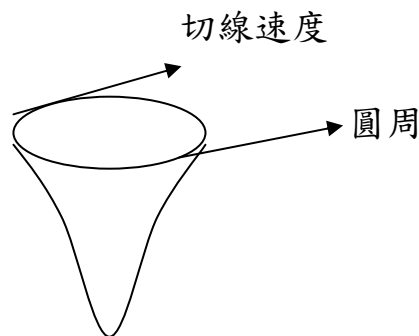
因而推論出：速度不同，流線不同，渦旋結構不同。  
所以，一種形狀在速率 a 時，渦旋阻力最小，並不表示在速率 b 時稱王。

這個結論很有意思：平日所謂的賽車應該標明表現最佳的速率範圍；而賽車選手更要了解能讓賽車表現最好的黃金速率。

## § 第五節

### { 渦旋與能量 }

#### (一) 順勢而為，渦旋增強



$$\text{圓周長} \times \text{切線速度} = \text{渦旋強度}$$

#### (二) 渦旋遵守動量守恆定律

在動態系統中，渦旋常以相同大小，但相反方向成對出現。

◎ 浴缸中的渦旋，外圍速度慢，半徑大；而內圈速度快，但半徑小。

◎ 水龍頭下的渦旋，每次成對出現：大小相同方向相反。

### 大自然中的渦旋，遵守動量守恆

(三) 運動體後方渦旋，消耗動能；  
渦旋強度強，則動能耗損多。

(四) 物體之幾何形狀，影響運動時的渦旋結構。

(五) 速度不同，流線不同，渦旋結構不同；因之而生的渦旋阻力不同。

# 2002 年台灣國際科學展覽會研究報告

## 第三單元

# 乘著歌聲的翅膀

### 第三單元 【渦旋對物體上升的協助與阻礙】



觀察自然界的翅膀[種子、小鳥、昆蟲]

探討上升力的加成因素

上升的阻礙

失速時的渦旋結構

三角翼

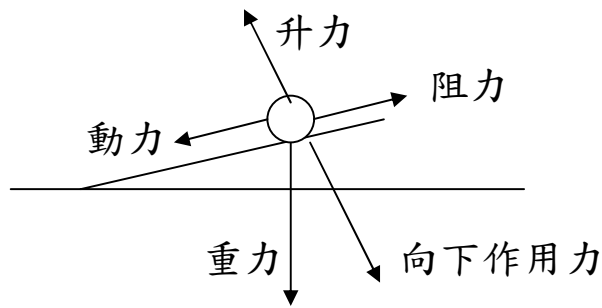
渦旋的旋律

## 第一節

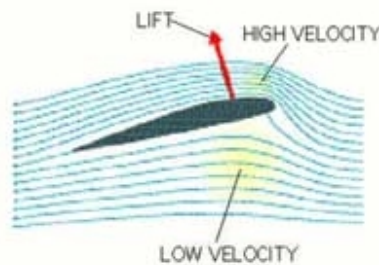
### { Preliminaries }

1. 本實驗主要是探討低雷諾數的流場中渦旋對上升力造成的阻礙與協助。並研究上升力的基本要素。

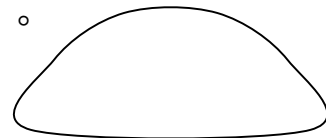
#### 2. 上升力的力圖



3.



- ★ 上升力本身是物體對流體作用力的‘反作用力’。
- ★ 上升基本應自牛頓定律闡明。
- ★ 一般皆從柏努利定律說明，稍嫌不足。
- ★ 因為單就翼面上下路徑之差來解釋速度差、進而壓力差，那麼就算是小小一架紙飛機，其機翼剖面也須如右圖才能產生所需要的升力。



#### 4. 飛機的身材係數～展弦比(AR 值)

$b^2/S$  約為  $b/c$

$b$  : 兩翼尖端的距離

$S$  : 機翼面積

$C$  : 弦長

#### 5. 渦旋阻力(Induced Drag)

流體流過物體邊緣，產生端渦 (Tip Vortices) 。

渦旋本身帶有能量，造成物體能量損失。

#### 6. 升力 = Potential Flow Lift + Vortex Lift (渦旋升力)

#### 7. 攻角 【機翼與流體之間的夾角】

#### 8. 滯空時間 【停留在空中的時間】

#### 9. Re 【雷諾係數～物體相對於流體的環境係數】

## 第二節

### { 研究設備器材 }

#### (一) 簡易實驗水槽 [已使用四年]

60cmx60cmx100cm

#### (二) 渦流實驗水槽 [30cmx150cmx30cm]

#### (三) 機翼模型 [置於水中測試渦旋]

#### (四) 簡易實驗飛機模型 [二十架]

機身/ 機翼/ 尾舵

※機翼面積均為 200 平方公分

※機身與尾舵均完全相同

#### (五) 發射台 [以橡皮筋做的彈力發射器]

#### (六) 模型小鳥一隻

#### (七) 量筒,清水,食用色素,脫脂鮮奶,酒精

## 第三節

### { 研究方法 }

#### 【前言】

這次實驗是藉由：觀察自然界中最普遍的畫面：樹葉及種子的飄落、小鳥的飛翔；進而探討物體得以上升、停滯空中的基本現象。

這次實驗暫時不深入討論動力；也就是假設小鳥是能動的（發條啟動）、飛機是能平順飛的。

因為無法測量升力的大小：是用滯空時間作為評估的方式。

在撕紙自由落地實驗中，我先將紙舉起也就是讓紙具有位能，再放手讓紙自由落下，位能會慢慢減少，動能增加，直到接觸地面。

在模型小鳥實驗中，轉動發條，其實就是給予動力（彈力），發條轉動的越多圈，動力越大，速度也越快。

在實驗飛機項目中，我的發射架是使用橡皮筋的彈力發射（實驗過程中暫時不考慮動力因素；一方面在小鳥實驗中已討論過【由於在觀察紙張飄落的項目中，體認到『與空氣接觸面積的大小』是討論升力的一環；所以，在設計模型飛機時將＜翅膀面積＞設為相同、機身相同、尾舵相同；但是翅膀形狀不同；對相同飛機以＜不同發射角度＞處理。】另一方面也是有意讓翅膀的形狀成為操縱變因。所以固定動力、機身、翅膀面積、尾舵。）

※這次的實驗，並不討論如何做飛機；但是，我的實驗飛機的做法：是盡量將重心放在機翼前三分之一的地方。因為根據資料：機翼的升力合力點是在機翼前三分之一的地方。將升力與重力放在同一點是避免產生翻滾。

【三分之一定位點適用於矩形翼】



## (一) 滑翔實驗

1. 取一張紙[八開圖畫紙大小，紙質隨意]
2. 雙手左右各執紙一端平舉齊眉
3. 鬆手讓紙自由落下
4. 記錄滯空時間[自鬆手至落地]
5. 將紙均分為二
6. 重複步驟二至步驟五

- ★平舉紙時，以水平、微彎曲、非常彎曲，各試一次。
- ★除了記錄滯空時間，也要觀察紙落下的路徑。
- ★實驗次數是做到紙約為四分之一郵票大小。
- ★實驗場地盡量寬敞，盡量保持無風狀態。

## (二) 拍撲實驗

1. 取出實驗用的模型小鳥
2. 旋轉發條
3. 鬆手擲出小鳥
4. 記錄滯空時間[自鬆手至落地]
5. 重複步驟二至步驟四

- ★旋轉發條時，以五轉、十轉、二十轉，各試一次。
- ★除了記錄滯空時間，也要觀察小鳥落下的路徑。
- ★發條不要太緊，以免影響實驗的可信度。
- ★實驗場地盡量寬敞，盡量保持無風狀態。
- ★若能尋覓安全的高處，效果更好。

### (三) 滯空實驗

1. 設置彈力發射台
2. 取出實驗用的簡易飛機模型
3. 每一架編號
4. 安裝模型機並發射
5. 記錄滯空時間[自發射至落地]
6. 重複步驟七至步驟十一

★架設發射台時，以攻角  $0^{\circ}$   $4^{\circ}$   $11^{\circ}$   $-4^{\circ}$  各試一次。

★除了記錄滯空時間，也要觀察飛機飛行的路徑。

★橡皮筋不要太緊，以免影響實驗的可信度。

★實驗場地盡量寬大，盡量保持無風狀態。

★飛行中途若有碰撞，則記錄無效。

★盡量多測幾次，保持實驗的可信度。

※在簡易飛行翼實驗中，經過多次反覆實驗，發現小飛機經常上升到某個高點突然倒栽蔥掉了下來。為了更深入了解簡易飛行翼突然失去控制無法繼續停留在空中的原因，特地設計了在實驗水槽中的實驗：

#### 實驗水槽中的實驗

1. 同一翼面，不同攻角【觀察流線變化】

※在簡易飛行翼實驗中，經過多次反覆實驗，發現小飛機中《三角翼及後掠翼》表現特別；

#### 實驗水槽中的實驗

2. 不同翼面 【觀察後掠角度不同的三角翼】
3. 翼面表面的光滑度

#### (四) 上升的阻礙～～失速時的流線變化

2. 進行實驗水槽準備
3. 將水槽放滿水後排空，排除前次實驗的影響
4. 調製染料
5. 設置染料滴定
6. 將機翼模型準備好
7. 放出染料 觀察水流流過機翼

★保持水流流速之穩定

★實驗須在水平靜時進行

★機翼模型在攻角  $0^\circ$   $5^\circ$   $15^\circ$   $20^\circ$   $-5^\circ$  各試一次

※染料的調製是依比例設定

(1) 清水：食用色素 = 100：9

(2) 紅色染劑：脫脂鮮奶：酒精 = 105：25：35

#### (五) 捍衛戰士～～三角翼

1. 進行實驗水槽準備
2. 將水槽放滿水後排空，排除前次實驗的影響
3. 調製染料
4. 設置染料滴定
5. 將三角翼模型準備好
6. 放出染料 觀察水流流過機翼

★保持水流流速之穩定

★實驗須在水平靜時進行

★機翼模型在攻角  $0^\circ$   $5^\circ$   $15^\circ$   $20^\circ$   $-5^\circ$  各試一次

※染料的調製是依比例設定：紅色染劑：脫脂鮮奶：酒精 = 105：25：35

## 第四節

### { 研究結果 }

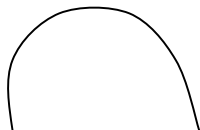
#### (一) 滑翔實驗

##### \* 紙張大小 與 滯空時間

- |           |              |
|-----------|--------------|
| (1) 1 張   | 滯空時間 : 2.85  |
| (2) ½張    | 滯空時間 : 2.865 |
| (3) ¼張    | 滯空時間 : 2.86  |
| (4) 1/8   | 滯空時間 : 2.72  |
| (5) 1/16  | 滯空時間 : 2.38  |
| (6) 1/32  | 滯空時間 : 2.50  |
| (7) 1/64  | 滯空時間 : 2.43  |
| (8) 1/128 | 滯空時間 : 2.84  |
| (9) 1/256 | 滯空時間 : 2.49  |
| (A)1/512  | 滯空時間 : 2.65  |

##### \* 紙張彎曲度 與 滯空時間

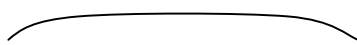
1. 2.21 秒



2. 2.48 秒



3. 2.59 秒



#### (二) 拍撲實驗

##### \* 翅膀拍撲次數 與 滯空時間

- |              |             |
|--------------|-------------|
| (1) 完全沒有拍撲動作 | 滯空時間 : 0.86 |
| (2) 拍撲五下     | 滯空時間 : 1.21 |
| (3) 拍撲十下     | 滯空時間 : 1.98 |
| (4) 拍撲二十下    | 滯空時間 : 2.92 |

※由於模型小鳥重量遠超過紙飛機  
在實驗過程中‘飄’的機會很少。

### (三) 乘著歌聲的翅膀～～低雷諾數滯空實驗

＊實驗模型機試飛之發射角度 與 滯空時間

(1) 半翼面積 100cm 平方～矩形翼【滯空時間 || 飛行距】

矩形翼	發射角度 0°	4°	12°	20°
15.5x6.5x2 №7	2.69 秒 2.11 " 4. 6m	3.18 秒 2.48 " 4. 2m	3.67 秒 3.71 " 5. 0m	3.41 秒 3.67 " 3. 7m
12.5x8.0x2 №5	2.64 " 2.73 " 14. 4m	2.60 " 2.55 " 10. 7m	2.67 " 1.69 " 10. 4m	3.11 " 2.36 " 12. 9m
10.0x10.x2 №3	2.90 " 3.55 " 13. 0m	3.11 " 3.28 " 9. 3m	2.75 " 3.37 " 9. 2m	- 2.48 " 6. 6m

◆№7 展弦比=4.77；№5 展弦比=3.125；№3 展弦比=2.0

- ※ 由於無法測量飛行翼在空中的飛行長度，所以飛行距是用發射台與落地點之間的距離來測量。在這種測量基礎上，滯空時間與飛行距沒有比例的關係；但是飛行距仍是一項很好的參考數值。
- ※ №7 的飛行距比其他兩架都小，那是因為№7 下降時會迴轉，所以滯空時間長,但是距離發射台[飛行距]不遠。
- ※ №7 在落地近地面時，會滑翔一段距離。經過反覆多次實驗，發現 A/R 值較大的飛行翼在落地近地面時比較會飄[滑翔]。

## ◎後掠機型

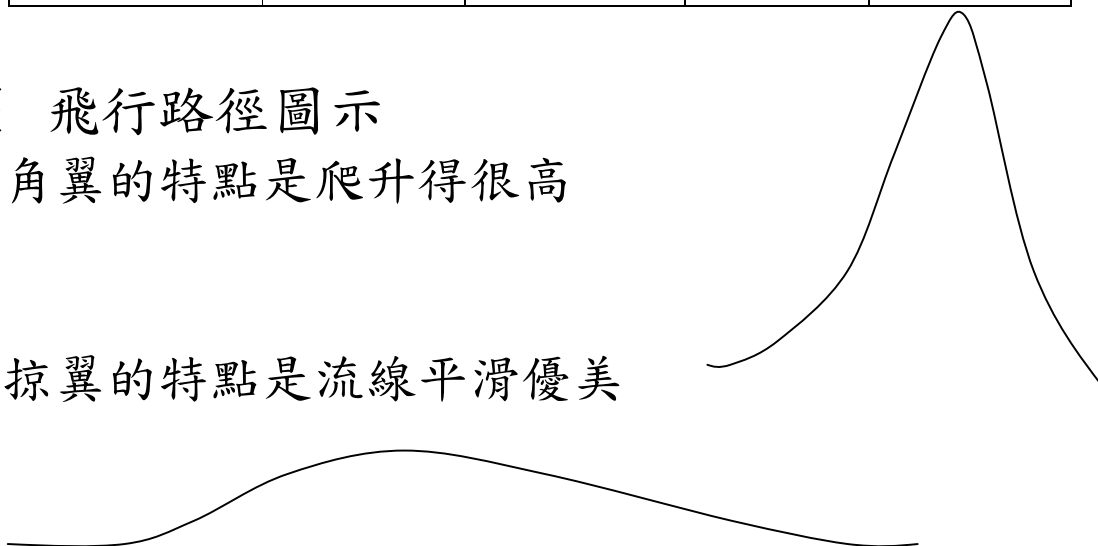
(2) 半翼面積 100cm 平方～後掠型【滯空時間 || 飛行距】

三角翼№8	發射角度 0°	4°	12°	20°
半翼展=10cm	3.19 秒	3.33 秒	2.89 秒	-
最大弦長 20 cm	2.84 // 10.2m	3.48 // 13.35m	2.79 // 7.5m	2.50 // 6.48m
後掠翼№9	0°	4°	12°	20°
半翼展=11cm	2.83 秒	2.66 秒	2.75 秒	-
平均弦長 9.1 cm	2.96 // 11.3m	3.37 // 7.51m	3.23 // 12. m	2.87 // 6.66m

### ※ 飛行路徑圖示

三角翼的特點是爬升得很高

後掠翼的特點是流線平滑優美



※ 三角翼能爬升得很高，可是往往倒栽蔥掉下來。

## ◎梯形

(3) 半翼面積 100cm 平方～梯形翼【滯空時間 || 飛行距】

梯形翼№1	發射角度 0°	4°	12°	20°
半翼展=11.1cm	2.48 秒	3.38 秒	4.05 秒	-
平均弦長 9.0 cm	3.55 // 6.3m	2.66 // 1.1m	2.53 // 5.2m	2.81 // 2.17m

## ◎橢圓形

(4) 半翼面積 100cm 平方～橢圓形翼【滯空時間 || 飛行距】

橢圓翼 №6	發射角度 0°	4°	12°	20°
半翼展=16cm	3.28 秒	2.76 秒	2.34 秒	-
平均弦長 6.7 cm	3.15 // 9.5m	3.21 // 12.5m	2.96 // 11.3m	2.40 // 3.95m

※ 以上七架飛機是用半翼面積=100cm 平方製作

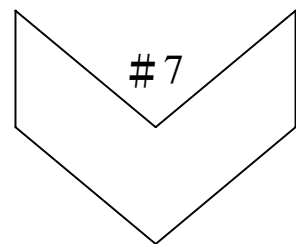
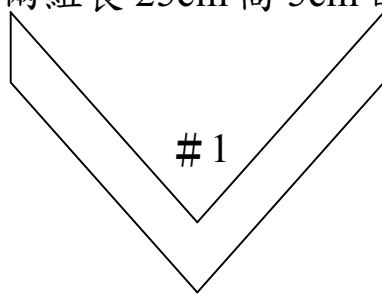
※ 以下八架飛機是用全翼面積=250cm 平方製作

## ◎後掠翼

(5) 全翼面積 250cm 平方～後掠型【滯空時間 || 飛行距】

後掠 50° #1	0°	4°	12°	20°
半翼展=14.5cm				
平均弦長 8.0 cm	1.68 // 6.4m	1.79 // 5.0m	1.98 // 5.92m	1.78 // 4.5m
後掠 40° #7	0°	4°	12°	20°
半翼展=8.7cm				-
平均弦長 12.5 cm	2.73 // 11.7m	2.78 // 11.1m	2.66 // 10.0m	3.11 // 10.8m

※ #1 是由兩組長 25cm 高 5cm 的平行四邊形拼成



#7 是由兩組 12.5x10 平行四邊形拼成

※ #7 是後掠 40°，在距離與滯空時間測試上均優於 #1。

## ◎三角翼

(5) 全翼面積 250cm 平方～三角翼【滯空時間 || 飛行距】

後掠 70° #4	0°	4°	12°	20°
半翼展=11.5cm 平均弦長 9.5 cm	2.84 " 9.8m	2.91 " 10.0m	2.75 " 8.56m	2.78 " 2.4m
後掠 45° #6	0°	4°	12°	20°
半翼展=15.2cm 平均弦長 7.3 cm	2.15 " 3.8m	2.46 " 2.3m	2.41 " 4.95m	- 2.62 " 0.2m

※ #4 是△[60°、60°、60°]，#6 是△[90°、45°、45°]

※ #4 能夠爬升得很高；尤其是發射角度 12° 時，他上升得幾乎碰到體育館的屋頂；令人印象深刻。

## ◎矩形翼

(6) 全翼面積 250cm 平方～矩形翼【滯空時間 || 飛行距】

矩形翼	發射角度 0°	4°	12°	20°
25cmx10cm #2	2.03 " 3.84m	3.28 " 3.2m	2.91 " 4.57m	3.23 " 5.4m
20cmx12.5cm #5	2.46 " 10.26m	2.22 " 8.2m	2.03 " 7.9m	1.07 " 6.83m

◆ #2 展弦比=2.5；#5 展弦比=1.6

※低雷諾數的矩形翼，其展弦比值在 4°攻角以上會產生：展弦比值大者，滯空時間較大。



## ◎寬梯形翼

(6) 全翼面積 250cm 平方～胖梯形翼【滯空時間 || 飛行距】

梯形翼 #2	發射角度 0°	4°	12°	20°
半翼展=10cm 平均弦長 12.5cm	2.65 // 9.8m	3.42 // 12.6m	3.53 // 14.5m	3.01 // 9.85m

※ 最長的飛行距是由這架胖梯形所締造[14.5m]

※ 翼面是由兩個梯形組成[上底 10 下底 15 高 10]

※ 整體翼面面積 250cm 平方，看上去像個六角形。

## ◎橢圓翼

(6) 全翼面積 250cm 平方～橢圓形翼【滯空時間 || 飛行距】

橢圓翼 #8	發射角度 0°	4°	12°	20°
半翼展=22.1cm 平均弦長 5.0cm	3.23 // 9.56m	2.36 // 4.5m	2.00 // 5.7m	2.87 // 8.4m

※ 橢圓翼的表現，在 0°及 20°時，優於矩形翼。

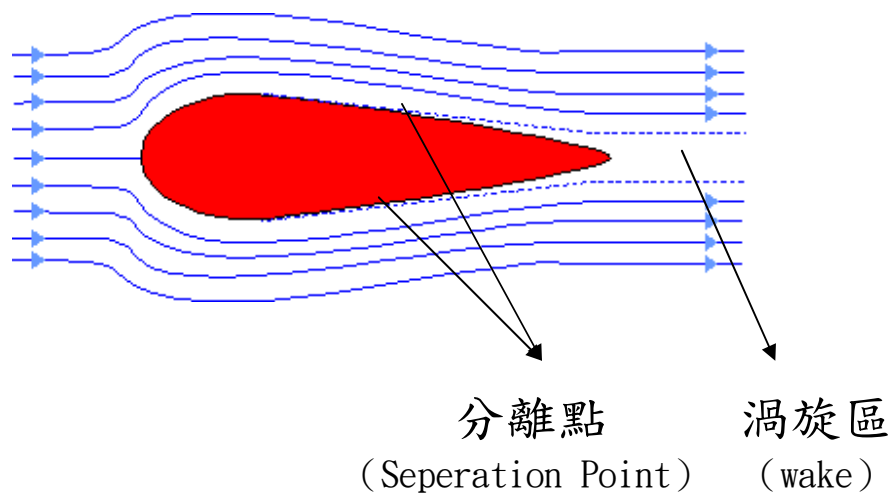
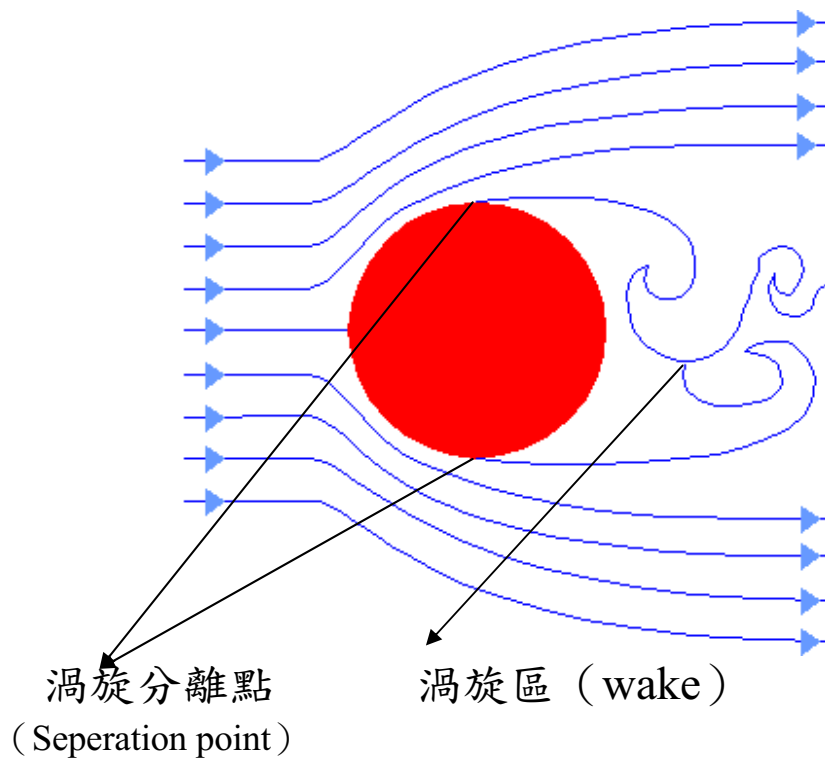
實驗結果統計：

低雷諾數的飛行翼，其「滯空時間」與「展弦比」並無規律性關係。「滯空時間」與「攻角」也沒有規律性的關係。但是「滯空時間」受到「攻角」與機翼造型影響。整體而言，三角翼、梯形翼、橢圓翼均優於矩形翼。

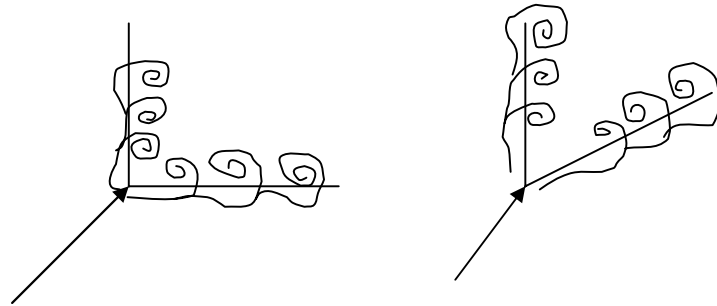
尤其是三角翼（more slender more swift）的爬高能力與梯形翼[上底 10 下底 15 高 10]的飛行能力，均是可以繼續研究的。

#### (四) 上升的阻礙～～渦旋剝離與分離點

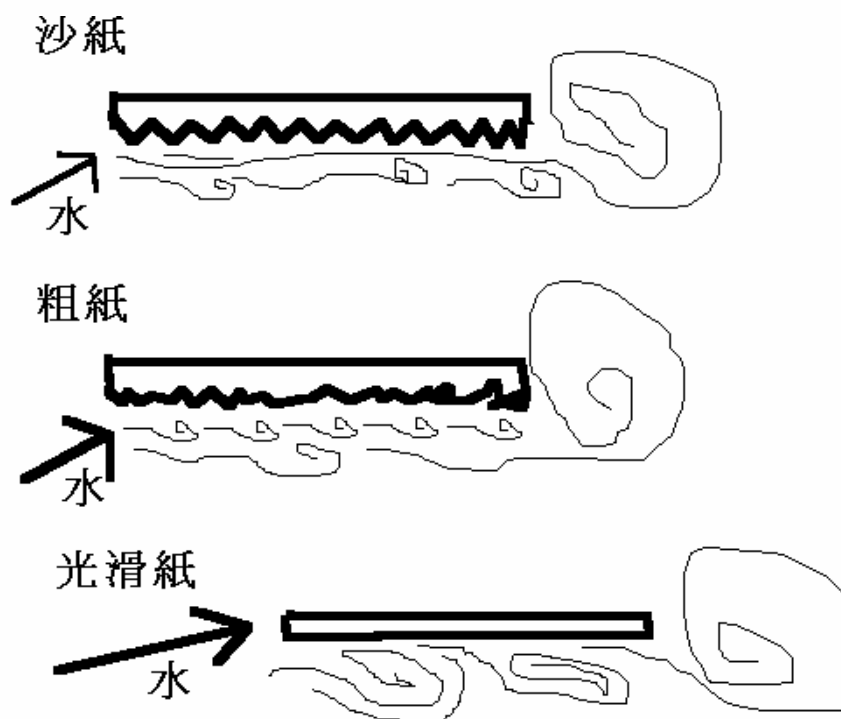
◎同一翼面，不同攻角～流線變化與渦旋結構



### (五) 渦旋與三角翼



### (六) 渦旋結構 與 翼面粗糙度



- ※砂紙雖然粗糙但是有規律性與粗紙就有很大的不同。
- ※粗糙的規律性值得研究。

## ◎實驗札記

在這次實驗中有三項意外的發現：

### [1] 撕紙自由落地時

在 1/128 紙片時，發現運動曲線截然不同。  
小片落地速度很快，但是滯空時間卻很長。

### [2] 在實驗水槽中，發現渦旋出現時：

必定成對；一個是逆時針，一個是順時針，  
一前一後，很有規律。

### [3] 一般機翼，表面很光滑，那是在高速時， 減少表面阻力；但是實驗發現：

★低雷諾數時 [就像我用的水槽]

有顆粒的表面，反而比光滑的表面，不容易  
產生渦旋！

## 第五節

### { 實驗結果討論 }

#### (一) 滯空時間的研究

在實驗中以滯空時間作為測量升力的一項指標

##### 1. 觀察起自細微處

在第一個實驗項中，可以發現幾個很有趣的現象：

- (1) 大張的紙重量比較重，但是『滯空時間』卻是比較久。  
所以誰能停留得久，面積是主要決定因素之一。
- (2) 而且大紙片與小紙片，運動曲線不同。
- (3) 由實驗可得：微向下彎曲的大紙片可以獲得較多的升力，滯空時間可以較長。

##### 2. 翅膀拍撲（flapping）學問大

(1) 小鳥翅膀拍撲次數越多，滯空時間越長。

(2) 拍撲動作一停止，小鳥便自由落下。

★那麼拍撲應是獲得升力的方法。

※如果仔細觀察小鳥，可以發現：

小鳥向下拍（down stroke）與向上撲（up stroke）並不完全相同。

向下時翅膀全張（面積較大），而向上時（面積較小），翅膀開始收起，一再重複動作。

### 3. 自簡易飛行翼著手

- 兩組個別重量相同
- 機身完全相同
- 兩組個別翅膀面積相同

所以兩組十五架模型飛機，不同的是翅膀的形狀：

※經過多次反覆實驗，發現發射角度及機翼造型，會影響滯空時間：

半翼面積 100cm 平方～三角翼【滯空時間 || 飛行距】

後掠 65° №8	發射角度 0°	4°	12°	20°
半翼展=10cm	3.02 秒	3.41 秒	2.84 秒	2.50
最大弦長 20 cm	2.84 " 10. 2m	3.48 " 13. 35m	2.79 " 7. 5m	2.50 " 6. 48m

全翼面積 250cm 平方～三角翼【滯空時間 || 飛行距】

後掠 70° #4	2.84 "	2.91 "	2.75 "	2.78 "
半翼展=11.5cm				
平均弦長 9.5 cm	2.84 " 9. 8m	2.91 " 10. 0m	2.75 " 8. 56m	2.78 " 2. 4m
後掠 45° #6	2.15 "	2.46 "	2.41 "	2.62 "
半翼展=15.2cm				-
平均弦長 7.3 cm	2.15 " 3. 8m	2.46 " 2. 3m	2.41 " 4. 95m	2.62 " 0. 2m

※後掠角度越大，速度越快，爬升得越高。

【後掠 70° #4：在發射角 12°時；爬升得最高】

(More slender, more talented)

※№8：後掠 65°[半翼展=10cm/最大弦長=20cm] 在發射角 4°時，滯空時間和飛行距都表現亮眼。

※三角翼特點是爬昇能力強，而後到臨界攻角時直直下墜。

半翼面積 100cm 平方

後掠 40° №9	0°	4°	12°	20°
半翼展=11cm	2.90 秒	3.02 秒	2.99 秒	2.87
平均弦長 9.1 cm	2.96 " 11.3m	3.37 " 7.51m	3.23 " 12. m	2.87 " 6.66m

全翼面積 250cm 平方～後掠型【滯空時間 || 飛行距】

後掠 50° #1	1.68 "	1.79 "	1.98 "	1.78 "
半翼展=14.5cm				
平均弦長 8.0 cm	1.68 " 6.4m	1.79 " 5.0m	1.98 " 5.92m	1.78 " 4.5m
後掠 40° #7	2.73 "	2.78 "	2.66 "	3.11 "
半翼展=8.7cm				-
平均弦長 12.5 cm	2.73 " 11.7m	2.78 " 11.1m	2.66 " 10.0m	3.11 " 10.8m

※№9 和 #7 的飛行流線都非常優美；但是№9 的 AR 值較大，滯空時間比 #7 長。

◎Induced Drag (from tip vortices)

在上一次的實驗中,了解到物體運動時,會產生渦旋阻力。

★渦旋阻力較大，動能損失較多

※實驗用的飛機：結構非常簡單,機身/機翼/尾舵，而與空氣接觸最多的部分，應是機翼。

★渦旋阻力的來源應是機翼。

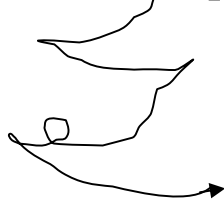
※在這次實驗中 •重量相同•機身完全相同•翅膀面積相同

每架實驗機，滯空時間不同，運動流線不同。

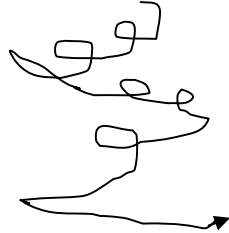
## (二) 優美的曲線

一張紙片不受外力下自由落地

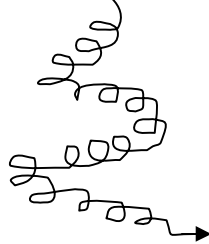
面積 [1 1/2 1/4]



面積 [1/8 1/16 1/32 1/64]



面積 [1/128 及更小的]



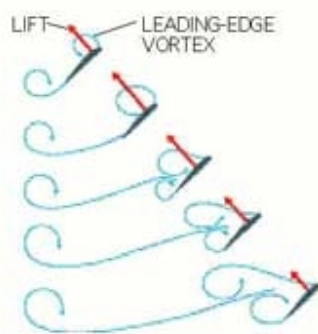
★仔細觀察，自 1/128 開始，運動曲線與之前較大張的完全不同。滯空時間突然變長。

※自然界也有很多類似的例子，很多植物的種子都帶著小翅膀。由本實驗發現 1/128[A4\*1/128] 大小，其滯空時間突然變長，不難想像：如此大小的植物種子自然孕育天成的巧妙。



★經過多次反覆實驗，發現攻角及機翼造型，的確影響滯空時間。為了更深入了解攻角及機翼造型對飛行的影響；以及渦旋在其中的變化～由於渦旋在空氣中很難顯現,特地設計了在實驗水槽中的實驗：

### (三) 相同翼面/不同攻角～渦旋結構



★ 由實驗結果發現：攻角愈大，渦旋產生愈早。

★ 攻角的改變，影響流線。

當攻角為  $0^\circ$  時流線平靜離開翼面一段距離後看到渦線  
但是＜攻角漸大＞時，『渦旋發生得越早，越來越明顯』。

渦旋的產生若妨礙了流線繞行物體的完整性，上升力將無法持續；物體無法繼續停留在空中。

#### (四) 三角翼與後掠翼

三角翼速度最快。上升的最高。

後掠翼飛行流線最穩定。平滑上升[爬昇不高]，  
平滑下降。在負攻角時，滯空時間最長。

- ★ 在實驗水槽中，發現水流經過三角翼時，會自側邊翻捲而上，造成翼上層表面速度比其他翼面[矩形或梯形或橢圓]快；壓力差較大，因而升力較大。

### 第六節

#### { 結論 }

#### (一) 取得升力（無外力支援時）

一個物體要能夠上升且停留空中

[一] 先取得動力 ～ 啟動

[二] 適當的攻角

[三] 往復式的拍撲

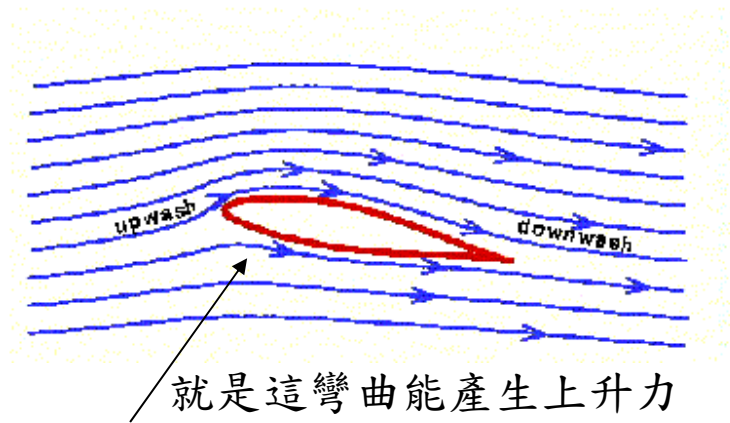
[四] 較大的接觸面積（與空氣）

[五] 渦旋助力 { 昆蟲，三角翼 }

## (二) 失去升力

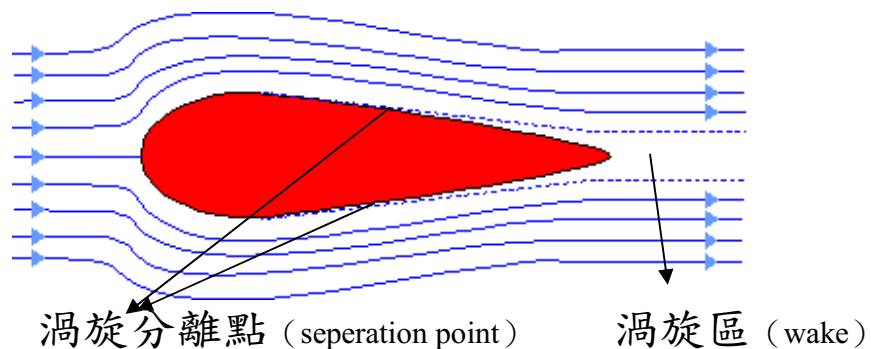
1. 渦旋阻力增強
2. 渦流分離點提早發生
3. 攻角不適當
4. 形體之重心/流線不適當

## (三) 攻角是上升力最重要的影響元素



由於對流體能產生向下作用力，  
因此得到升力[反作用力]。

## (四) 渦旋結構是影響攻角選擇最重要的元素



## （五）渦旋遵守動量守恆

自實驗中發現：渦旋出現時，必然成對。  
一個是逆時針，一個是順時針。

# 2002 年台灣國際科學展覽會研究報告

## 第四單元

# 渦 旋 大 師

# 第四單元【渦旋比例尺與昆蟲飛行機制探密】

## 淺論鳥類飛行機制

(Flap、Twist)

## 昆蟲飛行機制探討

(Clap、Fling Mechanism、Dynamic Stall)

## 八字型飛行機制

(To Fly in a Figure of Eight Pattern)

## 渦旋比例尺

(Hovering Ability, Lift Coefficient、Reciprocating Motion of Vortices)

All insects flap their wings approximately in a plane: we call it the stroke plane. There is often a small amount of movement perpendicular to that plane, We can ignore those movements and simply consider that the wing flaps in a plane。

The stroke plane is usually horizontal during hovering, just like for a helicopter。 With increasing flight speed, the plane tilts nose-down, again like a helicopter。

We have filmed many insects, and even at high speeds the stroke plane does not tilt beyond about 60 degrees。 This is probably because their wings have lower lift-to-drag ratios than birds。

Most butterflies use a fling mechanism to increase the circulation around their wings, whereas dragonflies keep the left and right wings well apart and don't use a fling。

.....By Professor Ellington, Cambridge, U.K.

運動體環境參數：Reynolds Number

一個運動體放大或縮小後其Reynolds Number不變，則二者稱為相似體。

# 第一節

## { 鳥類飛行機制 }

翅膀拍動（Flap）：利用牛頓『作用力-反作用力』，產生昇力（Lift）。

推進機制（Thrusting）：翅膀適度傾斜以產生前進力。

大型鳥類翅膀面積很大，容易產生升力；所以拍擊的頻率並不高（not high frequency）。

◆加大面積與提高速度均為提高升力的有效方法。

大型鳥類節省能量：

- （1）滑翔（Gliding）
- （2）利用V字型隊伍（V Formation）
- （3）利用地面效應（Ground Effect）

小型鳥類升力來源：快速的拍翅（High Frequency）

⇒ 滯空時間與翅膀拍動頻率成正比。

（第三單元實驗-低雷諾數拍翅頻率與升力）

Flapping is an angular movement about an axis in the direction of flight。

Flapping flight is possible with only two degrees of freedom：

Flapping and Thrusting。

Using only these two degrees of freedom，there are 3 important variables with respect to wing kinematics：

Wing Beat Frequency，Wing Beat Amplitude，and Wing Feathering as a function of wing position。

In general，as wing beat frequency increases，wing beat amplitude decreases。

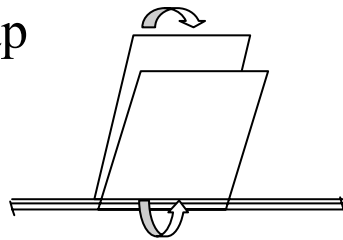
## 第二節

### { 昆蟲飛行機制探討 }

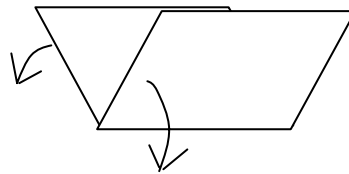
#### ◎ 實驗重點：滯空時間（Hovering Ability）

##### 1. Weis-Fogh Mechanism

a、Clap



b、Fling（揮動）



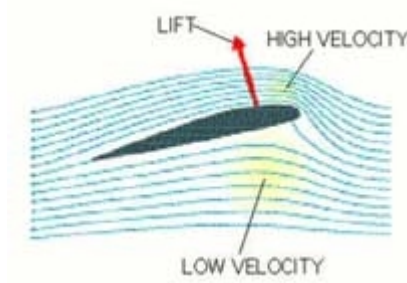
##### 2. Clap + Fling 的優點：持續的上升力 (Circulation is Continuous)

3. 當翅膀揮動（Fling）時，翅膀邊緣會產生強的壓力差，因而產生翼前緣渦旋（Leading edge vortex）；但接之而來的拍擊（Clap）則保存此渦旋，讓渦旋暫留；因而產生持續性的升力。
4. 鳥類與昆蟲的飛行機制並不完全相似，昆蟲因為體積小許多，對於氣流的微小變化較為敏感。此外昆蟲運用 clap 機制，是鳥類沒有的。鳥類並不能夠技巧的利用渦旋。



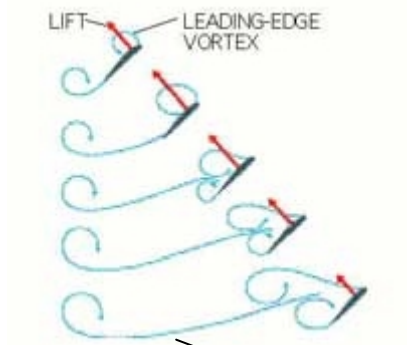
### 第三節

#### { 八字型的飛行機制 }

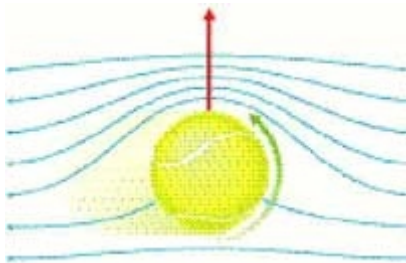


速度大壓力小、速度小壓力大  
.....柏努利定理.....

壓力梯度造成翼前緣渦旋 (leading edge vortices)



→ 昆蟲會巧妙地保留此渦旋，提高了升力。不但如此，這些渦旋藉著八字型 (fly in the figure of eight pattern) 旋轉及反旋轉的機制，適時的造成反作用力，巧妙的再次提高了升力。



當小球接受逆時針旋轉的外力，造成壓力差，產生上升力。

★蜂鳥、蜻蜓、大痣螳均是擅用八字型飛行的高手。

## 第四節

### { 渦旋比例尺 }

#### 1. 渦旋實驗結論

- \* 渦旋具有動量。遵循動量守恆。
- \* 飛行載具中，以『後掠型（三角翼）』能妥善利用渦流。
- \* 會飛行的動物，若能適當地保存渦旋，則將有助於飛行。若任由渦旋剝離、消散，則反而造成阻力（上升力的損失）。
- \* 渦旋剝離後的流場，若不能有效的再利用（Recycle：例如，候鳥遷徙時排成的 V 字型隊伍。），將會製造混亂（Chaos：例如，飛機的尾流。）
- \* 能夠利用八字型飛行機制的動物，其滯空能力優於一般昆蟲。
- \* 八字型飛行機制下，滯空能力最佳，能量耗損最少。
- \* 渦旋是能量的一種形式。

#### 2. 渦旋比例尺

渦旋是可以測量的，但是並不容易。若跳脫昂貴的器械、複雜的運算，可以用『滯空時間』（或第二單元中滑行的距離）估算渦旋的強度。

若雷諾數相同的兩物體，其滯空時間與渦旋強度成正比。

滯空時間與渦旋利用度成正比。

# 2002 年台灣國際科學展覽會研究報告

## 第五單元

# 結 論 與 應 用

# 2002 年台灣國際科學展覽會研究報告

## 【結論】

- (一) 渦旋遵守『動量守恆』原理。  
Conservation of Vorticity。
- (二) 在低雷諾數流場中 (Of low Reynolds Number)，  
渦旋能細緻的處理 (disposed like small air parcels)。  
以蜻蜓的八字型飛行 (in a figure of eight pattern)  
為代表。
- (三) 在高雷諾數流場中 (Of high Reynolds Number)，  
渦旋能產生強大升力 (Vortex Lift)。  
以三角翼充分利用渦流為代表。
- (四) 運動物體本身的速度不同，則渦旋結構不同。
- (五) 渦旋帶有能量，若能利用則增加能量。  
若無法利用，反而形成阻力 (Induced drag)。
- (六) 順勢而為，渦旋增強。  
是以渦旋強度而言，Rotation > Linear、  
In a figure of eight pattern > Fling。

## 【應用】


1、

大氣與海洋掌握了地球主要的脈動，而渦旋則是流體中重要的運動形式，熱帶氣旋、颶風、颱風、龍捲風，其本質全是渦旋。

『如何能有效的預測？』似乎端賴我們是否能再多了解一些渦旋～地球環境下的渦旋。

◇第一單元中安排了一個實驗：測試片上有多個圓孔，觀察 air core 的進行方向。我們發現，air core 最後一定會選定一個洞口，不會分散；但是在過程中 air core 跳躍不停，一副拿不定主意的樣子。這情況像是颶風、颱風、龍捲風，所以先模擬，再找出可防範的機制，應是指日可期的。

2、

第一單元的排水口實驗發現：如果排水口面積相同，則 air core 等長，與排水口形狀無關；但是有一個形狀例外，那就是 ，它的 air core 特別長，表示摩擦力較小。

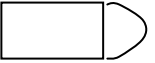
從這兒可以了解到：

☆ 與 ○ 反而相似。  與 ○ 並不相似。

### 3、

在第二單元結論中有一項：運動物體本身速度不同時，會有不同的阻力（Induced Drag）。

喜愛賽車的人士請注意：每一輛車，都有它的『黃金速率』，在此速率下，阻力最小。

在第二單元中，也能發現： 前方後橢圓之立體，在相同能量下，進行距離最長。

### 4、

第三單元實驗中發現：粗糙無規律的物表阻力比粗糙有形者為大。

### 5、

在自然界中有一些渦旋大師們，已與地球共存超過數百萬年，它們每一個細緻的動作都足以彰顯地球天演進化的過程。

目前實驗的重心是：盡可能地多了解一些自然界渦旋大師們的精心傑作，以彌補人類在這方面經驗之不足。我們若能多學到一些如何駕馭渦旋的秘訣，必能對飛行載具的安全性上多一分自信。