

第四屆旺宏科學獎  
成果報告書

參賽編號：SA4-264

作品名稱：大自然的飛行家—蝴蝶飛行之初步探討

姓 名：游舒淳

關 鍵 字：蝴蝶、飛行速率、展弦比

## 摘要

本研究主要針對蝴蝶之飛行進行探討，研究中主要探討蝴蝶翅膀形狀、身體重量、翅膀面積、展弦比、拍翅頻率及環境溫度對飛行速率之影響，並利用自製之風洞裝置，觀察蝴蝶之翼翅運動，分析通過蝴蝶模型之氣流方向及相關氣動力。

研究結果顯示：紋白蝶展翅約 4.5~5 cm，平均展弦比(AR)為  $1.71 \pm 0.12$ ，身體重量約為  $0.06 \pm 0.02$  g，翅膀面積約  $0.0012 \pm 0.0003$  m<sup>2</sup>，當紋白蝶身體重量愈重，則翅膀面積愈大( $R^2=0.9586$ )。另外，紋白蝶身體重量愈重、展弦比愈小，則飛行速率亦愈快( $R^2=0.5559$ 、 $R^2=0.4726$ )。23°C 時，紋白蝶飛行速率為  $1.01 \pm 0.24$  m/s，當環境溫度愈高(5、16、23°C)，則飛行速率亦愈快( $y=0.07x+0.7733$ ， $R^2=0.6967$ )。風洞實驗發現：蝴蝶會逆風而飛，當風洞的風愈強，蝴蝶翅膀拍動角度愈大，且快而持久，仰角也變大(45 度)；蝴蝶翼尖軌跡呈八字形，翼翅運動包含線性平移及旋轉；蝴蝶拍翅時，可在翅上方及前方產生低壓帶，在後方產生高壓帶，以利蝴蝶向前方飛行。另外，翅緣彎曲角度(上反角)愈大，蝴蝶模型之上升高度亦愈高，當上反角 60° 時，蝴蝶模型之上升高度最高( $2.2 \pm 0.1$ cm)。

## 目錄

|                |    |
|----------------|----|
| 摘要.....        | 1  |
| 目錄.....        | 2  |
| 壹、研究動機.....    | 3  |
| 貳、文獻探討.....    | 3  |
| 參、研究目的.....    | 7  |
| 肆、研究設備及器材..... | 7  |
| 伍、研究過程與方法..... | 10 |
| 陸、研究結果.....    | 13 |
| 柒、討論.....      | 21 |
| 捌、結論.....      | 23 |
| 玖、參考文獻.....    | 24 |

## 壹、研究動機

在校園或野外中的花叢中不難發現許多蝴蝶翩翩起舞，尤其是校園中常見的紋白蝶，讓我們不禁興起研究蝴蝶飛行奧秘的興趣。和老師討論之後，我們便由生物學與物理學兩方面，對影響蝴蝶飛行之因素做深入的調查和研究。

教材相關性：高二生命科學(下) 第六章第四節---動物的行為  
高二物質科學物理篇(下) 第十章第三節---流體力學

## 貳、文獻探討

### 一、流體力學

(一)白努力方程式：在一水平面上流動的流體，其流速越快，則流體的壓力越小；反之亦可類推。

$$\text{白努力方程式：} \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{(V_1)^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{(V_2)^2}{2}$$

(二)連續方程式： $\rho_1 \times A_1 \times V_1 = \rho_2 \times A_2 \times V_2$

### 二、微飛行器(MAV)之力學觀點

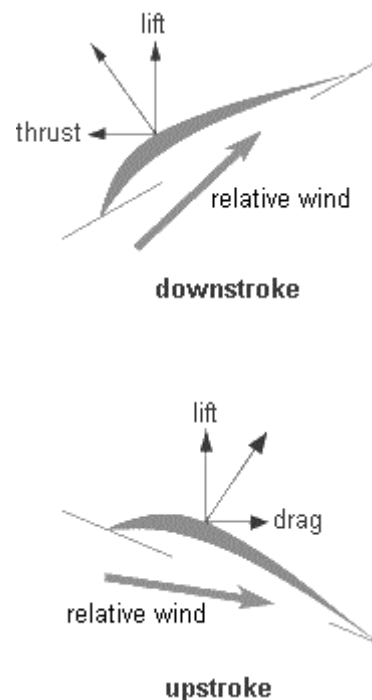
依據 1996 年美國國防部先進防衛研究計畫 (DARPA) 對於微飛行器 (Micro Air Vehicles, MAV) 之定義係指翼展小於 15 公分、飛行速度界於 8.33~16.67 m/s 的飛行器。以力學觀點而言，微飛行器由其升力產生與推進方式可分為：固定翼 (Fixed-Wing)、旋翼 (Rotary-Wing) 以及拍撲翼 (Flapping-Wing) 微飛行器等三大類，分述如下：(宋齊有，2002)

#### (一)固定翼微飛行器

固定翼微飛行器與平時所見大型飛行器相同，有一推進系統專司推力之產生；由推力提供前進動力，建立速度，而由主翼產生升力(圖一)。但由於翼展限制於 15cm 以內，因此為產生足夠升力，需較大翼面積，故展弦比 (Aspect-Ratio, AR) 均較小 (AR~1)，目前試飛成功之微飛行器設計大多屬於此類。

#### (二)旋翼微飛行器

旋翼微飛行器或稱微直昇機，目前主要有雙螺旋槳與四螺旋槳兩種。雙螺旋槳 MAV (如：德國 IMM 公司以機械加工製造之 19mm 長旋翼 MAV) 之基本構型設計與大型旋翼機相似，但具有四螺旋槳之 MAV (如：Michigan 大學之 HoverBot 以及 Stanford 大學之 Mesicopters 等)，其飛行動力特性與操控

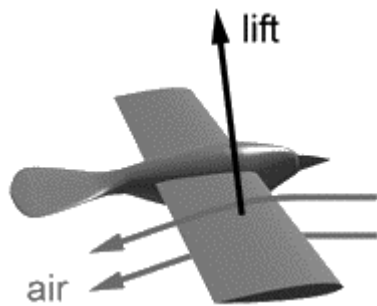


圖一 固定翼微飛行器之升力產生與推進方式

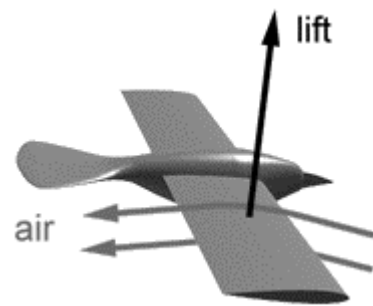
較為複雜。另外尚有一種早年提出之構想，源自昆蟲(如蜻蜓)之四翼交互運動轉化而成之兩平行同軸反轉之推力翼(Thrust-Wing)旋翼構型，近年也再度被提出研究。無論前述何種旋翼構型，推力與升力均來自旋翼機構，此點與固定翼之推力與升力之產生由不同分件負責是大不相同的。

### (三)拍撲翼微飛行器

拍撲翼微飛行器為三類中較特殊者，不同於固定翼，其升力與推力為同一來源--翼之拍撲(圖二、三)，但亦不同於旋翼，因拍撲翼之三維運動遠較旋翼更為複雜。由於拍撲機構之困難，不論大型或微型，至今均未見持續飛行成功之拍撲翼飛行器。此種飛行器在自然界中可仿效之對象極多，如各種昆蟲、鳥類等均利用其翼之拍撲運動同時產生推力與升力。拍撲翼具有許多固定翼闕如的優點，如能夠低速飛行、空中盤旋、急轉彎，甚至還可以向後飛，因此，近來航太工業紛紛投入大筆經費，進行拍撲翼飛行器的研究計畫。



圖二 In gliding flight, a bird's wings deflect air downward, causing a lift force that holds the bird up in the air.

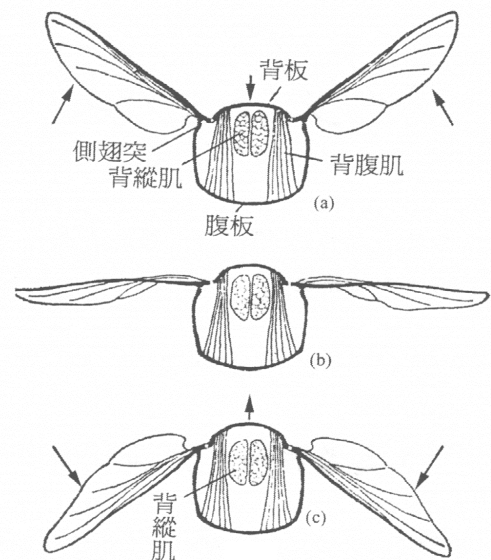


圖三 By tilting forward and going into a slight dive, the bird can maintain forward speed.

## 三、昆蟲的飛行

昆蟲最大的型態特徵，也是演化的主要關鍵，在於有翅膀能飛行。大多數昆蟲有 1-2 對翅，生於胸部背側(圖四)，由角質層往外延伸膜化而成，非附肢所特化，所以昆蟲飛行能力的獲得並未減損任一步足(相對於在飛行的鳥類和蝙蝠，翅膀由兩對附肢中的一對所特化形成，故一般在地面上的行動較為笨拙)。

昆蟲翅的演化，最初可能為角質層的延伸以增加體表的散熱容量，後來才成為飛行的器官。也有人認為昆蟲翅膀最初是用來由植物滑翔至地面，或充當水生昆蟲類的鰓部。而現生的石蠶蛾會利用它的小翅掠過地面，所以另一種假說：昆蟲翅膀最初功能是游泳，後來才演化具有飛行能力。蜻蜓為最早的有翅飛行昆蟲，具有二對相互協調的翅膀，一些稍後演化的昆蟲種類則有特化



圖四 昆蟲靠翅膀來產生飛行所需的推力和升力

說：昆蟲翅膀最初功能是游泳，後來才演化具有飛行能力。蜻蜓為最早的有翅飛行昆蟲，具有二對相互協調的翅膀，一些稍後演化的昆蟲種類則有特化

的飛行配備，蜂、胡蜂的二對翅膀利用小勾，疊置密合宛若一層，使前、後翅動作一致。蝴蝶翅膀兩對，前、後二翅相互重疊，飛行亦是一致性。甲蟲的前翅特化為質地堅硬的鞘狀構造，當其在地面活動或掘洞穴時用以保護後翅，稱為翅鞘，而後翅膜質較大，用於飛行。

昆蟲有近 100 萬種能夠飛行，但昆蟲並沒有演化出像螺旋槳或噴射引擎般的推進構造，都是靠翅膀來產生飛行所需的推力和升力(圖四)，以克服阻力和重力，當翅膀下拍時，會同時產生向上的升力以及向前的推力。

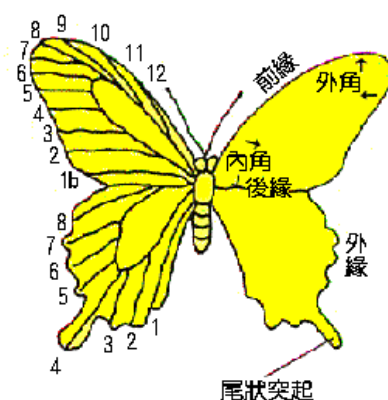
昆蟲的拍翅頻率是隨著體積增加而減少的，昆蟲如果越小，就需要更頻繁的拍翅以產生足夠的升力。蜜蜂、蜻蜓等昆蟲，拍翅方式則大多是 8 字形拍法，從側面來看，翅兩端的拍動軌跡是沿著我們寫 8 這個數字的筆順。而蜂鳥及蒼蠅的拍動軌跡是橫躺的 8 字型，如同符號∞，尤其是停懸在空中時。(張書忱，民 68)。

#### 四、蝴蝶之翅膀

研究蝴蝶翅膀之構造，需從翅脈、翅室及鱗片等三方面著手：

##### (一)翅脈

蝴蝶翅膀上具有很多翅脈，翅脈是由翅芽內氣管支分散所形成。按翅脈之分布情形可知翅之飛翔能力強弱，翅脈的數目及分布型式稱為脈相(venation)，脈相在科、屬分類上具有重要參考價值。翅脈有縱脈和橫脈兩類，縱脈與橫脈所形成的空間叫翅室，翅室的名稱乃用圍成翅脈中數字號碼小的為名，如由 2 與 3 脈圍成的翅室叫第 2 室，另外，在翅近中央處被許多脈圍成的翅室叫中室。(王效岳、白九維，民 92)。翅脈的命名通常採用康尼(Comstock-Needham)或漢普森氏(Hampson)命名法，圖五為採用漢普森氏翅脈命名法，由第 1a 脈開始至第 12 脈為止。蝴蝶翅膀之主要翅脈如下(表一，康尼氏翅脈命名法)：



圖五 蝴蝶之翅脈圖

表一 蝴蝶之翅脈

| A.縱脈(Longitudinal veins) | B.橫脈(Cross veins) |
|--------------------------|-------------------|
| 1.前緣前脈(Pc)               | 1.徑脈橫脈(r)         |
| 2.前緣脈(C)                 | 2.徑分橫脈(s)         |
| 3.亞前緣脈(Sc)               | 3.徑中橫脈(r-m)       |
| 4.徑脈(R)                  | 4.中脈橫脈(m-m)       |
| 5.中脈(M)                  | 5.中肘橫脈(m-cu)      |
| 6.肘脈(Cu)                 |                   |
| 7.後肘脈(Pcu)               |                   |
| 8.臀脈(A)                  |                   |
| 9.翅垂脈(J)                 |                   |

## (二)翅區

翅區的質地在近前緣者和在近後緣者不同，且翅脈分布在近前緣者和在近後緣者亦不相同。一般而言，近翅前方的翅脈比較集中且加粗，使翅之前半部比較堅強，而近翅後方的翅脈比較稀疏，致翅之後半部比較柔弱，於是在飛翔時，翅之前半部處於主動，翅之後半部處於被動。翅之前方比較堅強部份稱為翅主區(Rm)，是翅之飛行運動的主要部分，翅之後方的柔弱部份稱為翅扇區(Vn)，翅扇區常略呈三角形，翅主區和翅扇區以翅扇褶(位後肘脈Pcu和第一扇狀脈1V間)為界。一般飛行較慢的昆蟲，其翅扇區較大，而飛行較快的昆蟲，其翅扇區較小，因此昆蟲翅扇區的面積大小與其飛行速率成反比(張書忱，民68)。

## (三)鱗片

蝴蝶的翅上覆蓋許多球拍狀的鱗片如屋瓦般疊反覆蓋(圖六)，鱗片演變之謎，有許多說法，但一般均認為蝴蝶的祖先是毛翅目演化而來。當蝴蝶遭到蜘蛛網黏困時，可藉由掙扎而讓鱗片脫落黏附於蜘蛛網表面，藉以脫困。在自然環境中，雖有極多的蝴蝶遭蜘蛛捕食，但卻有更多蝴蝶藉此逃脫。

鱗片可以防水(圖七)並強化翅的結構，增強飛行能力，且可作為一小型太陽能接收器，吸收熱量提升體溫以便活動(關崇智，民81)。蝴蝶翅上的花紋是由這些不同顏色的鱗片所組成的，因此，鱗片可在求偶、交尾、逃避敵害上提供視覺效果，另外，鱗片也是蝴蝶發散費洛蒙及堆積有毒物質之場所(廖智安，民88)。



圖六 蝴蝶鱗片(220x)



圖七 蝴蝶翅膀不容易沾濕

## 參、研究目的

- 一、觀察蝴蝶翅膀之外形、翅脈及鱗片。
- 二、探討翅膀形狀、身體重量、翅膀面積、展弦比、拍翅頻率及環境溫度對蝴蝶飛行速率之影響。
- 三、利用自製之風洞裝置，觀察蝴蝶之翼翅運動，分析通過蝴蝶模型之氣流方向及相關氣動力。

## 肆、研究設備及器材

### 一、實驗器材

| 儀器設備                         | 數量  |
|------------------------------|-----|
| 光學顯微鏡(Olympus NO.100)        | 1 台 |
| 立體解剖顯微鏡                      | 1 台 |
| 數位照相機(FUJIFILM FinePix 6900) | 1 台 |
| 顯微照相機(Nikon FM2)             | 1 台 |
| 風速計(Lutron LM-81AM)          | 1 台 |
| 電子天平                         | 1 台 |
| 自製風洞(112cm×38cm×38cm)        | 1 台 |

| 儀器設備  | 數量  |
|---|-----|
| 三角袋   | 2 包 |
| 飼養箱(200cm×100cm×150cm)                                      | 1 個 |
| 蝴蝶觀察箱(15cm×10cm×15cm)                                       | 1 個 |
| 二氧化錳(MnO <sub>2</sub> )、雙氧水(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) |     |
| 保麗龍箱、冰塊、食鹽、溫度計  |     |
| 燈泡、直尺、皮尺、碼錶   |     |
| 保麗龍板、切割器、油性筆  |     |



圖八 電子天平、三角袋、碼錶



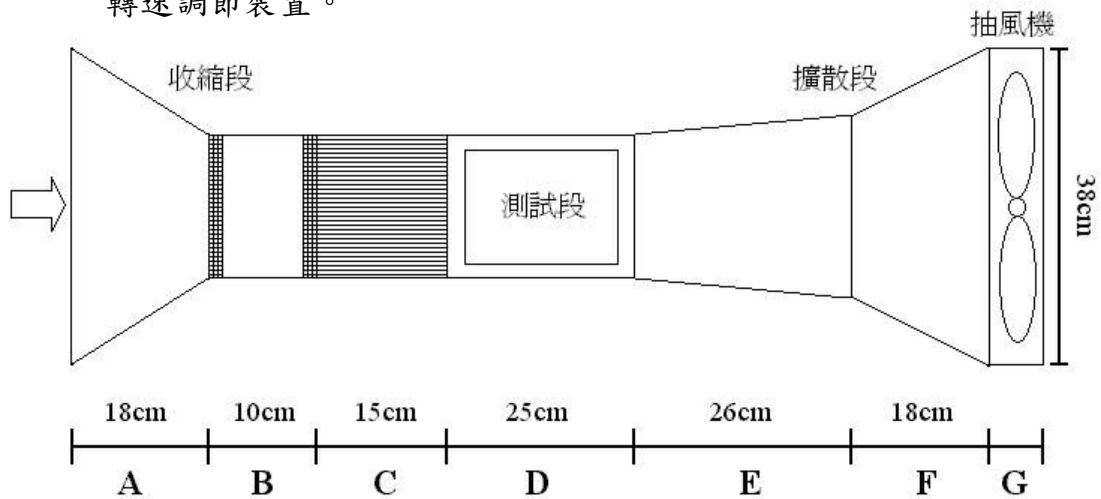
圖九 保麗龍箱、冰塊、食鹽、溫度計



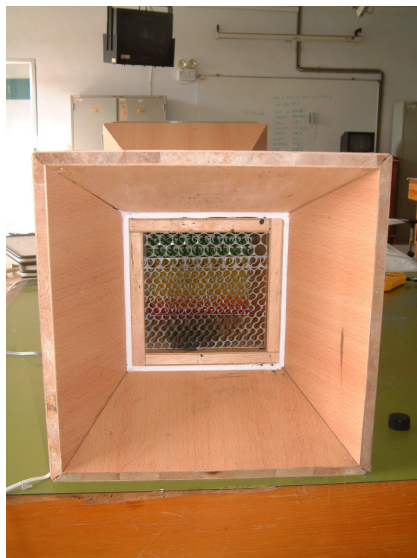
## 二、實驗設備製作

### (一)風洞製作

- 1.風洞定義：一種製造空氣平行流動的裝置，主要是為研究機翼及機體的浮力和阻力之用。本研究根據成功大學航太系之低速風洞結構，設計風洞(112cm×38cm×38cm)(圖十、十三)。
- 2.以 1.5 公分厚之木板製作風洞外框和隔板。風洞共分為 7 段(圖十)：
  - (1)A(收縮段)：收集風並使其流進風洞。
  - (2)B(第一整流段)：利用鐵網作為整流網，共兩片(相距 10 公分)(圖十一)。
  - (3)C(第二整流段)：以直徑 0.5 公分之吸管整流，產生穩定之平行風吹入測試段(圖十二)。
  - (4)D(測試段)：規格 25cm×20cm×20cm，底部置一支架以放置蝴蝶模型。
  - (5)E(第一擴散段)：使通過測試段的風速逐漸減弱。
  - (6)F(第二擴散段)：使減弱的風順利排出風洞。
  - (7)G(風扇段)：固定工業用抽風機作為風力來源，抽風機電源連接自製之轉速調節裝置。



圖十 風洞設計圖



圖十一 收縮段(A)及第一整流段(B)



圖十二 第二整流段(C)及測試段(D)



圖十三 自製之風洞裝置



圖十四 利用保麗龍板製作之蝴蝶模型

## (二) 蝴蝶模型製作

1. 影印蝴蝶圖形後，將保麗龍板依照實際大小之蝴蝶圖形裁切。
2. 找出蝴蝶模型之重心後，在模型上打一個 0.4cm 的洞。
3. 在蝴蝶模型之前、後翅距身體約 1/2 處，以火略微加熱，將前、後翅外緣 (翅扇區) 向上彎曲，分別彎曲為  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  及  $90^\circ$  之上反角 (圖十四)。

## 伍、實驗過程與方法

### 一、蝴蝶採集與飼養

- (一)利用捕網採集台東利嘉、鹿野、龍田村及校園內(圖十五、十六)飛行的蝴蝶，若個體不完整或帶傷，則不予捕捉。
- (二)將所採集的蝴蝶分別編號後，裝入三角袋，迅速帶回實驗室觀察。
- (三)將採集的蝴蝶置入飼養箱內飼養，並放入食草葉片後以紗網封住開口，並避免將飼養箱放置於太陽直射、溫度過高處。



圖十五 採集蝴蝶之大南國小校園



圖十六 採集蝴蝶之鹿野某處菜園

### 二、紋白蝶翅膀之觀察

- (一)利用立體解剖顯微鏡觀察紋白蝶翅膀之鱗片，繪圖並拍照。
- (二)利用毛刷刷除翅膀上的鱗片，觀察其翅膜和翅脈。

### 三、身體重量、翅膀面積、展弦比之測量

- (一)以電子天平秤出秤量紙重量，再將採集的蝴蝶放置於秤量紙上，將兩數值相減計算出蝴蝶重量(g)。
- (二)搜集數本有比例大小的蝴蝶圖鑑書籍，並選擇鳳蝶科、蛺蝶科、蛇目蝶科等台灣常見的蝴蝶種類，作為調查對象。
- (三)取一張 A4 紙，算出 A4 紙面積，以電子天平秤出 A4 紙重量。將採集的蝴蝶，平放於此 A4 紙上描下翅膀外形，然後剪下這些翅形紙片，置於電子天平秤出重量，再利用下列公式計算出蝴蝶前、後翅面積(m<sup>2</sup>)。

$$\text{翅膀面積}(m^2) = \frac{\text{A4紙面積}(m^2)}{\text{A4紙重量}(g)} \times \text{翅形紙片重量}(g)$$

- (四)依據書中所拍攝的蝴蝶大小尺寸，量測每一種蝴蝶翅膀的最上長度 L1(前翅的兩翅間長度)、最下長度 L2(後翅的兩翅間長度)、對角線長 R(前、後翅之兩翅間對角長度)，依照所標示比例換算成實際長度(m)，再利用下列公式計算展弦比(AS)。

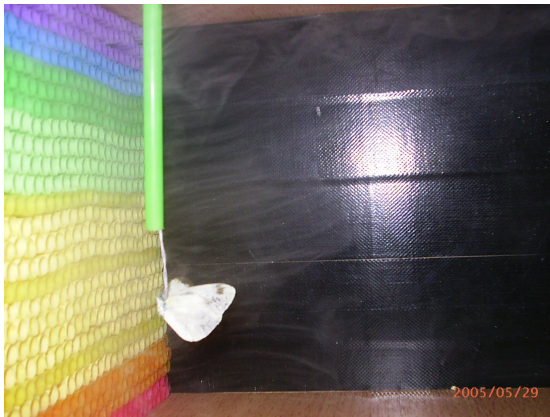
$$\text{展弦比} = \frac{L1 \times L2(m^2)}{\text{翅膀面積}(m^2)}$$

#### 四、不同溫度下對紋白蝶飛行速率之影響

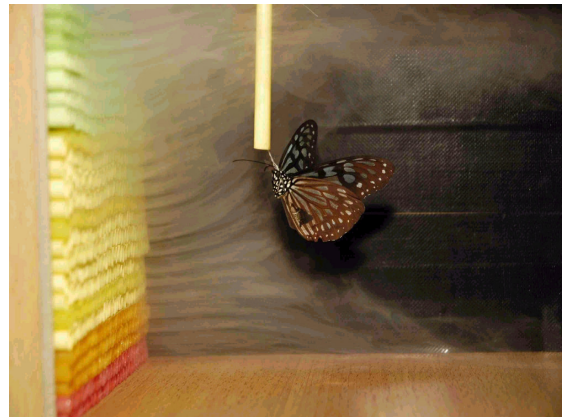
- (一)將實驗室門窗緊閉並關閉風扇，挑選十隻已編號之紋白蝶，於室溫下(23°C)分別在實驗室內同一釋放點放飛並計時，以紋白蝶第一個碰觸點為停止點，用皮尺測量其飛行距離，每隻紋白蝶皆六重複後，計算其平均飛行速率(cm/s)。
- (二)取二個保麗龍箱裝置如下：
  - T2：保麗龍箱內放置溫度計，放入冰塊後，調整箱內溫度至 16°C。
  - T3：保麗龍箱內放置溫度計，放入冰塊、氯化鈉後，調整箱內溫度至 5°C。
- (三)挑選十隻已編號之紋白蝶，放入 T2 保麗龍箱內，於 60 秒後取出，分別在實驗室同一釋放點放飛並計時，以紋白蝶第一個碰觸點為停止點，用皮尺測量其飛行距離，每隻紋白蝶皆三重複後，再放入 T2 保麗龍箱內，於 30 秒後取出，重複上述步驟後，計算其平均飛行速率(cm/s)。
- (四)挑選十隻已編號之紋白蝶，放入 T3 保麗龍箱內，重複步驟 3，計算其平均飛行速率(cm/s)。

#### 五、風洞實驗

- (一)觀察蝴蝶之翼翅運動及氣流方向
  - 1.將蝴蝶胸部之背側以細線黏附，細線外套著吸管，再將細線及吸管另一端黏附於風洞測試段上方木板。
  - 2.打開抽風機電源，以轉速調節裝置調整測試段內之風速至 3m/s。
  - 3.在風洞收縮段前，以濃雙氧水(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)倒入二氧化錳(MnO<sub>2</sub>)中產生水氣，觀察水氣流過風洞測試段內蝴蝶翼翅運動的情形(圖十七、十八)。



圖十七 觀察紋白蝶之翼翅運動



圖十八 觀察青斑蝶之翼翅運動

(二)不同翅緣彎曲角度(上反角)對氣流方向、升力之影響

- 1.於風洞測試段底部放置一支架，支架上以油性筆標記刻度。
- 2.蝴蝶模型之重心穿過支架後，平放於測試段底部。
- 3.打開抽風機電源，以轉速調節裝置調整測試段內之風速至 3m/s。
- 4.風的流動會使蝴蝶模型浮起，記錄其浮起之高度，每個蝴蝶模型( $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ )各實驗 5 次
- 5.在風洞收縮段前，以濃雙氧水( $H_2O_2$ )倒入二氧化錳( $MnO_2$ )中產生水氣，觀察水氣流過風洞測試段內蝴蝶模型翅膀的情形(圖十九)。



圖十九 觀察蝴蝶模型之氣流方向及升力情形

## 陸、研究結果

### 一、紋白蝶之觀察

紋白蝶(*Pieris rapae crucivora boisduval*，日本紋白蝶、菜白蝶)，其幼蟲俗稱菜蟲，屬於鱗翅目(Lepidoptera)粉蝶科(Pieridae)，食草主要以十字花科(油菜、甘藍菜、山芥菜)主。

(一)型態特徵：展翅 4.5~5 cm，翅膀底色呈白色，前翅外緣有黑色斑紋，後翅外緣則無，可與另一類似種台灣紋白蝶(*Pieris canidia*)區分(圖二十、二十一)。雌蝶翅表基部有成片黑鱗，翅膀腹面有些個體明顯黃化。

(二)生態地位：紋白蝶據信是從日本入侵的外來種，它們和臺灣紋白蝶互相競爭生存空間，紋白蝶通常於低海拔及平地區較占優勢，而城市及山區中則以台灣紋白蝶較占優勢。



圖二十 紋白蝶(*Pieris rapae crucivora*)



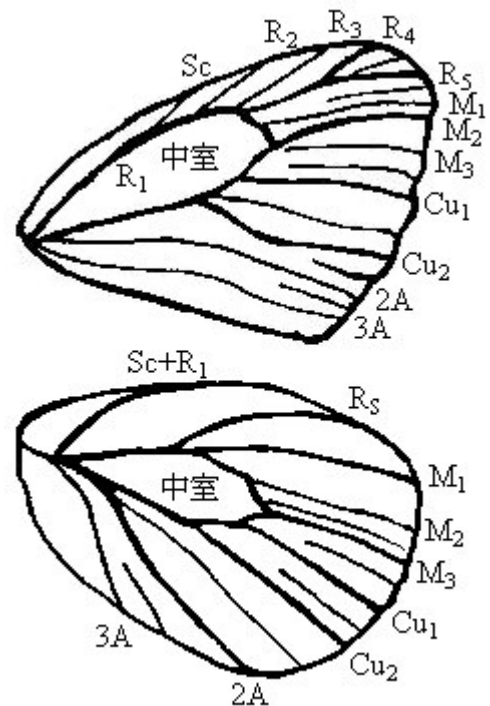
圖二十一 台灣紋白蝶(*Pieris canidia*)

### 二、紋白蝶翅膀之觀察

紋白蝶翅脈之觀察結果如下(圖二十二)：

前翅翅脈：具有亞前緣脈(Sc)一條，徑脈(R)五條(R<sub>1</sub>~R<sub>5</sub>)，中脈(M)三條(M<sub>1</sub>~M<sub>3</sub>)，肘脈(Cu)兩條(Cu<sub>1</sub>、Cu<sub>2</sub>)，臀脈(A)兩條(2A、3A)。

後翅翅脈：具有亞前緣脈+徑脈(Sc+R<sub>1</sub>)一條，徑脈(R<sub>5</sub>)一條，中脈(M)三條(M<sub>1</sub>~M<sub>3</sub>)，肘脈(Cu)兩條(Cu<sub>1</sub>、Cu<sub>2</sub>)，臀脈(A)兩條(2A、3A)。



圖二十二 紋白蝶之前、後翅翅脈

### 三、前後翅長度之測定

測量結果顯示(表二、三、四)：鳳蝶科、蛺蝶科及蛇目蝶科的最上長度(前翅的兩翅間長度)大多大於最下長度(後翅的兩翅間長度)，且蛺蝶科的最上長度(L1)和最下長度(L2)相差較大(比值=3.37)。由對角線長(R)來看，鳳蝶科算是較大型的蝴蝶(平均對角線長=8.9 cm)，而本研究之實驗材料--紋白蝶，其最上長度約  $4.95 \pm 0.41$  cm，最下長度約  $4.10 \pm 0.55$  cm，對角線長約  $4.84 \pm 0.49$  cm，屬於中小型的蝴蝶。

表三 鳳蝶科蝴蝶的前後翅膀的測量

| 中名     | 最上長度<br>(cm) | 最下長度<br>(cm) | 最上長度/<br>最下長度 | 對角線長<br>(cm) |
|--------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 台灣麝香鳳蝶 | 11.0         | 12.5         | 0.9           | 15.2         |
| 寬尾鳳蝶   | 10.1         | 7.2          | 1.4           | 11.7         |
| 大鳳蝶    | 10.4         | 4.0          | 2.6           | 12.0         |
| 麝香鳳蝶   | 7.4          | 7.3          | 1.0           | 10.2         |
| 大紅紋鳳蝶  | 8.0          | 7.1          | 1.1           | 9.5          |
| 大琉璃鳳蝶  | 8.0          | 6.9          | 1.2           | 9.6          |
| 曙光鳳蝶   | 8.8          | 5.1          | 1.7           | 9.9          |
| 寬青帶鳳蝶  | 6.0          | 5.1          | 1.2           | 8.1          |
| 台灣烏鴉鳳蝶 | 5.9          | 5.1          | 1.2           | 7.2          |
| 綠斑鳳蝶   | 5.9          | 4.1          | 1.4           | 7.2          |
| 青斑鳳蝶   | 6.0          | 3.4          | 1.8           | 7.5          |
| 昇天鳳蝶   | 5.5          | 4.1          | 1.3           | 7.1          |
| 無尾鳳蝶   | 6.4          | 3.2          | 2.0           | 7.0          |
| 高嶺昇天鳳蝶 | 4.6          | 5.0          | 0.9           | 7.0          |
| 紅紋鳳蝶   | 5.1          | 4.7          | 1.1           | 6.2          |
| 青帶鳳蝶   | 5.8          | 3.2          | 1.8           | 6.6          |
| 平均     | 6.8          | 5.5          | 1.4           | 8.9          |

表四 蛺蝶科蝴蝶的前後翅膀的測量

| 中名     | 最上長度<br>(cm) | 最下長度<br>(cm) | 最上長度/<br>最下長度 | 對角線長<br>(cm) |
|--------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 台灣黃斑蛺蝶 | 6.0          | 1.5          | 4.00          | 5.3          |
| 黃斑蛺蝶   | 5.0          | 1.7          | 2.94          | 6.8          |
| 雙尾蛺蝶   | 8.3          | 4.6          | 1.79          | 10.2         |
| 姬雙尾蛺蝶  | 7.7          | 4.8          | 1.62          | 9.2          |
| 紅蛺蝶    | 4.8          | 1.9          | 2.53          | 5.3          |
| 琉球紫蛺蝶  | 5.5          | 2.0          | 2.75          | 6.5          |
| 孔雀蛺蝶   | 4.3          | 1.3          | 3.31          | 4.6          |
| 孔雀青蛺蝶  | 4.6          | 1.5          | 3.07          | 4.6          |
| 黑端豹斑蝶  | 5.8          | 2.0          | 2.90          | 6.6          |
| 台灣小紫蛺蝶 | 5.2          | 1.6          | 3.25          | 6.4          |
| 枯葉蝶    | 5.2          | 2.2          | 2.32          | 9.1          |
| 紫單帶蛺蝶  | 5.6          | 2.2          | 2.50          | 8.5          |
| 小單帶蛺蝶  | 4.7          | 1.9          | 2.47          | 5.5          |
| 白簾紋蛺蝶  | 5.5          | 2.5          | 2.20          | 6.0          |
| 島嶼綠蛺蝶  | 6.0          | 2.0          | 3.00          | 6.6          |
| 埔里綠蛺蝶  | 5.9          | 2.3          | 2.54          | 6.7          |
| 台灣綠蛺蝶  | 6.4          | 1.4          | 4.54          | 7.2          |
| 閃電蛺蝶   | 6.0          | 1.9          | 3.16          | 6.5          |
| 黃三線蝶   | 5.0          | 0.5          | 10.00         | 4.2          |
| 台灣星三線蝶 | 5.2          | 2.0          | 2.67          | 6.1          |
| 泰雅三線蝶  | 4.9          | 1.5          | 3.27          | 5.0          |
| 細蝶     | 5.7          | 3.0          | 1.90          | 6.2          |
| 黑擬蛺蝶   | 3.9          | 1.5          | 2.60          | 5.0          |
| 豹紋蝶    | 5.0          | 1.1          | 4.55          | 4.9          |
| 黃頸蛺蝶   | 7.2          | 2.6          | 2.77          | 7.7          |
| 流星蛺蝶   | 6.2          | 2.1          | 2.92          | 6.8          |
| 白紋蝶    | 4.7          | 2.0          | 2.35          | 5.1          |
| 紅星蛺蝶   | 5.5          | 2.0          | 2.75          | 5.6          |
| 緋蛺蝶    | 5.2          | 1.5          | 3.47          | 5.6          |
| 白裙黃斑蛺蝶 | 4.7          | 1.6          | 2.94          | 5.0          |
| 樺蛺蝶    | 6.5          | 0.9          | 7.22          | 5.6          |
| 雌紅紫蛺蝶  | 5.5          | 1.0          | 5.45          | 4.5          |
| 大紫蛺蝶   | 8.3          | 1.5          | 5.51          | 8.2          |
| 平均     | 5.7          | 2.0          | 3.37          | 6.5          |

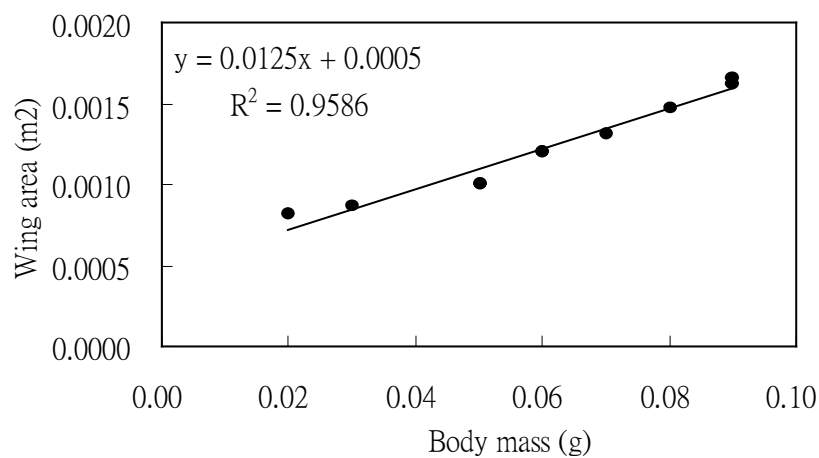


表五 蛇目蝶科蝴蝶的前後翅膀的測量

| 中名      | 最上長度<br>(cm) | 最下長度<br>(cm) | 最上長度/<br>最下長度 | 對角線長<br>(cm) |
|---------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 大玉帶黑蔭蝶  | 5.1          | 3.9          | 1.30          | 5.2          |
| 深山玉帶蔭蝶  | 3.5          | 3.1          | 1.13          | 4.3          |
| 玉帶蔭蝶    | 5            | 4.4          | 1.14          | 5.6          |
| 波紋玉帶蔭蝶  | 5.5          | 4.2          | 1.30          | 6            |
| 深山蔭蝶    | 5.5          | 3.5          | 1.57          | 5.9          |
| 阿里山黃斑蔭蝶 | 5            | 4            | 1.25          | 5.3          |
| 白尾黑蔭蝶   | 4.7          | 3.7          | 1.27          | 5.4          |
| 紫蛇目蝶    | 4.1          | 3.5          | 1.17          | 4.6          |
| 黑樹間蝶    | 4.6          | 5            | 0.92          | 6.4          |
| 白條斑蔭蝶   | 6.2          | 5.4          | 1.14          | 7            |
| 臺灣波紋蛇目蝶 | 4.5          | 2.2          | 2.05          | 3.8          |
| 大白帶黛蝶   | 5            | 3            | 1.67          | 2.6          |
| 平均      | 4.9          | 3.8          | 1.29          | 5.18         |

#### 四、身體重量與翅膀面積之關係

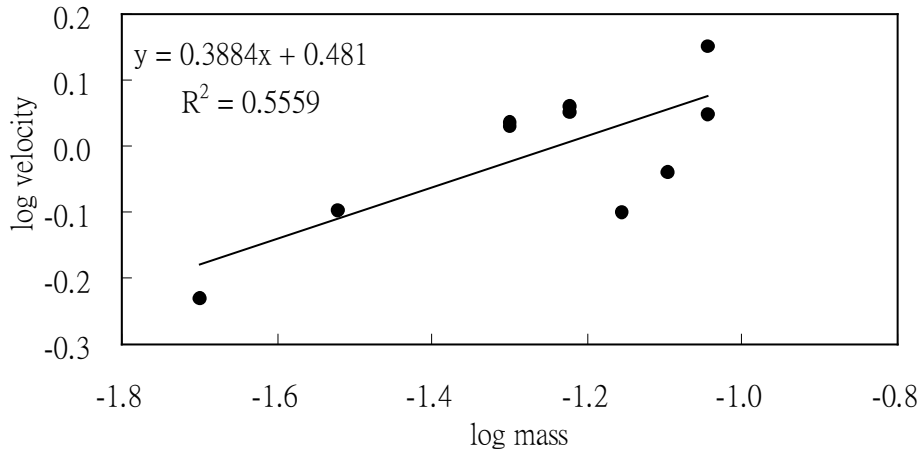
圖二十三為紋白蝶身體重量(g)與翅膀面積(m<sup>2</sup>)之關係曲線，紋白蝶的身體重量約為 0.06 ± 0.02 g，翅膀面積約 0.0012 ± 0.0003 m<sup>2</sup>。由結果顯示：當紋白蝶身體重量愈重，則翅膀面積亦愈大，兩者呈良好的線性關係(R<sup>2</sup>=0.9586)。



圖二十三 紋白蝶身體重量(g)與翅膀面積(m<sup>2</sup>)之關係曲線

## 五、身體重量對紋白蝶飛行速率之影響

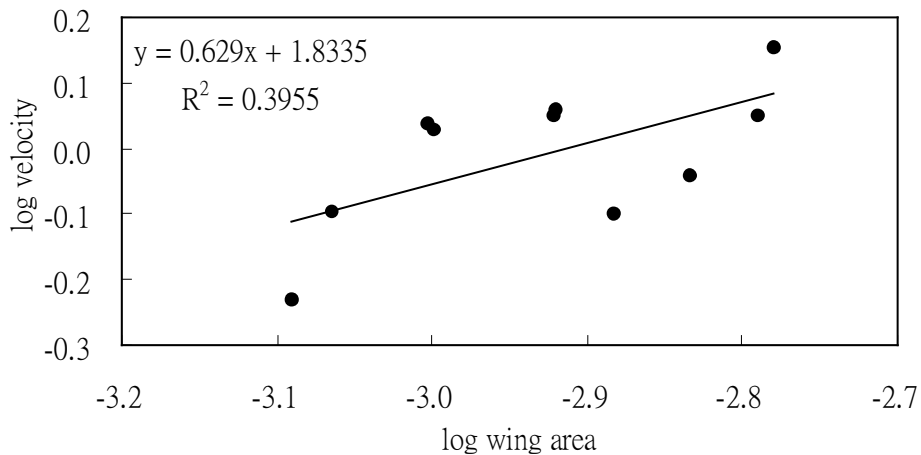
圖二十四為紋白蝶身體重量(g)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 23°C 下)。由結果顯示，當紋白蝶身體重量愈重，則飛行速率亦愈快，兩者呈中度相關( $R^2=0.5559$ )。



圖二十四 紋白蝶身體重量(g)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 23°C 下)

## 六、翅膀面積對紋白蝶飛行速率之影響

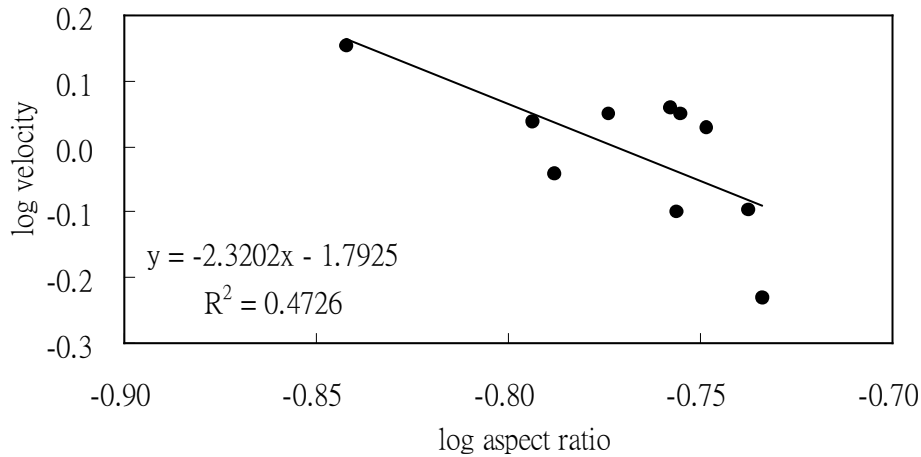
圖二十五為紋白蝶翅膀面積( $m^2$ )與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 23°C 下)。由結果顯示，紋白蝶翅膀面積與飛行速率，兩者呈中度相關( $R^2=0.3955$ )。



圖二十五 紋白蝶翅膀面積( $m^2$ )與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 23°C 下)

## 七、展弦比對紋白蝶飛行速率之影響

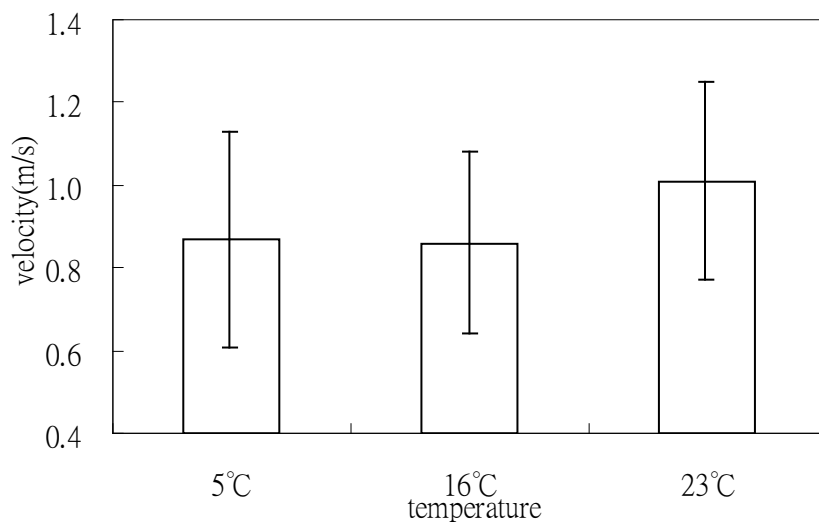
圖二十六為紋白蝶展弦比(AS)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 23°C 下)，紋白蝶的平均展弦比(A Aspect-Ratio, AR)為  $1.71 \pm 0.12$ 。由結果顯示，當展弦比(AR)愈小，則紋白蝶飛行速率亦會較快，兩者呈中度相關( $R^2=0.4726$ )。



圖二十六 紋白蝶展弦比(AR)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 23°C 下)

## 八、環境溫度對紋白蝶飛行速率之影響

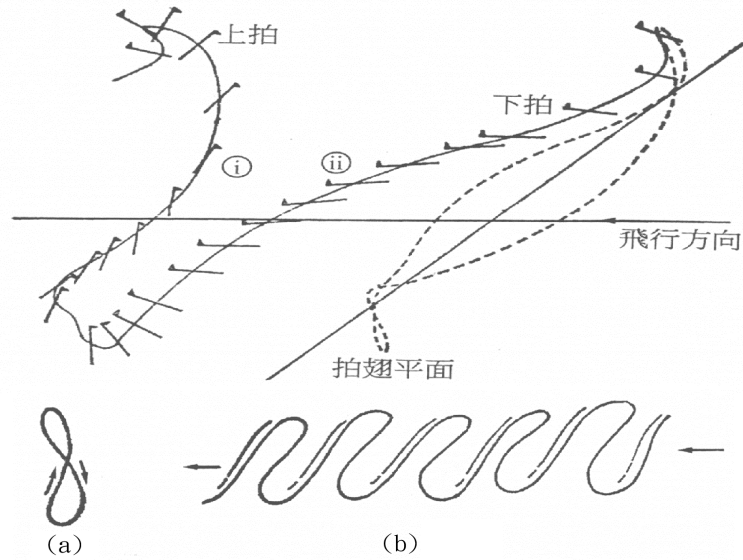
圖二十七為環境溫度與紋白蝶飛行速率(m/s)之關係圖。由結果顯示，5°C 時，紋白蝶飛行速率為  $0.87 \pm 0.26$  m/s，16°C 時，紋白蝶飛行速率為  $0.86 \pm 0.22$  m/s，而 23°C 時，紋白蝶飛行速率增加為  $1.01 \pm 0.24$  m/s。即當環境溫度愈高，則飛行速度亦愈快，環境溫度與飛行速率之關係呈中度相關( $y=0.07x + 0.7733$ ， $R^2=0.6967$ )。



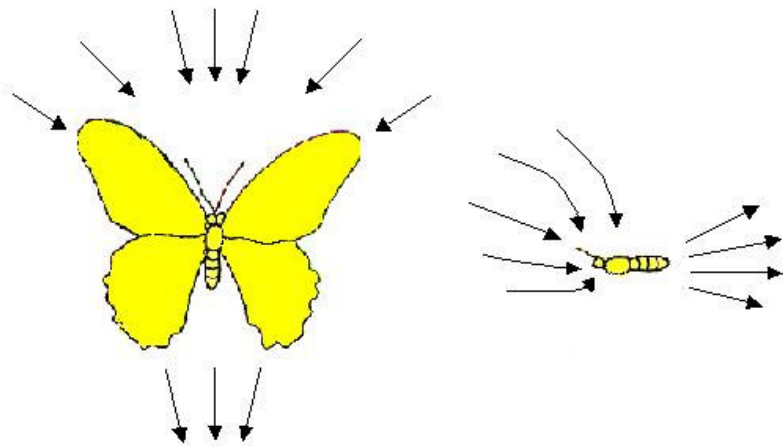
圖二十七 不同溫度(5°C、16°C、23°C)下，紋白蝶之飛行速率(m/s)

### 九、蝴蝶之翼翅運動及氣流方向

- (一)於風洞測試段觀察蝴蝶，發現蝴蝶會逆風而飛，當風洞的風愈強，蝴蝶翅膀拍動角度大，且快而持久，仰角也變大(45度)(圖十七、十八)。
- (二)觀察蝴蝶之翼翅運動，發現蝴蝶之翼翅運動包含線性平移及旋轉，且翼尖軌跡呈八字形(圖二十八 a)。
- (三)觀察蝴蝶拍翅之氣流方向發現，可在翅上方及前方產生低壓帶，在後方產生高壓帶，以利蝴蝶向前方飛行(圖二十九)。



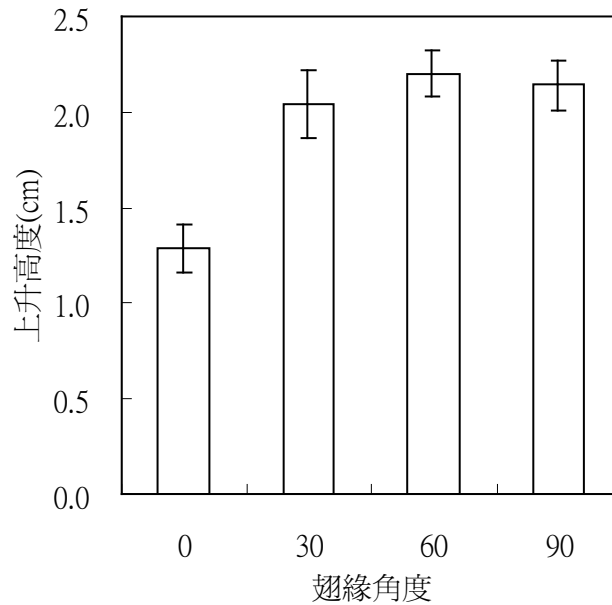
圖二十八 上下拍撲平移轉動模式



圖二十九 蝴蝶拍翅之氣流方向(風速 3m/s)

## 十、不同翅緣彎曲角度(上反角)對氣流方向、升力之影響

圖三十為在固定風速(3m/s)下，不同翅緣彎曲角度(上反角)與蝴蝶模型上升高度(cm)之關係圖。結果顯示：翅緣彎曲角度(上反角)愈大，蝴蝶模型之上升高度亦愈高，當彎曲角度(上反角)60°時，蝴蝶模型之上升高度最高(2.2±0.1cm)。



圖三十 不同翅緣彎曲角度(上反角)時(風速 3m/s)，蝴蝶模型之上升高度

## 柒、討論

一、按翅脈之分布情形可知翅之飛翔能力強弱，翅脈的數目及分布型式稱為脈相(venation)，脈相在科、屬分類上具有重要參考價值。研究過程中，我們利用毛筆刷掉紋白蝶翅膀上的鱗片後，發現紋白蝶具有半透明的翅膜和交錯縱橫的翅脈，並且發現亞前緣脈(Sc)和徑脈( $R_1$ )合併為一條，徑脈(R)也癒合為一，這種翅脈癒合現象常見於蝶蛾類和蚊蠅類等比較進化的昆蟲(王效岳、白久維，民 92)。

研究結果亦發現，紋白蝶翅膀的質地在近前緣者和在近後緣者不同，且翅脈分布在近前緣者和在近後緣者亦不相同。近翅前方的翅脈比較集中且加粗，而近翅後方的翅脈比較稀疏，致翅之後半部比較柔弱，於是在飛翔時，翅之前半部處於主動，翅之後半部處於被動。

二、一般大型飛行器的展弦比在 5~7 左右，而紋白蝶的平均展弦比(AR)為  $1.71 \pm 0.12$ ，通常展弦比(AR)愈大，滑翔愈好，展弦比愈小，速率愈快。由研究結果亦發現，當紋白蝶展弦比愈小，則飛行速度亦愈快，兩者呈中度相關( $R^2=0.4726$ )。

三、當紋白蝶身體重量愈重，則飛行速率亦愈快( $R^2=0.5559$ )，但身體重量愈重亦同時會增加翅膀面積( $R^2=0.9586$ )，通常昆蟲翅膀的面積大小與其飛行速率成反比(張書忱，民 68)。因此，推測昆蟲必須在身體重量和翅膀面積間取捨合宜，才能達成最佳的飛行。

四、一般翅形較窄之昆蟲，其翅之振幅較短，拍翅頻率較大，飛行較快，而翅形較寬之昆蟲，其翅之振幅較大，拍翅頻率較小，飛行較慢。由表六之整理發現，蠅類和蜜蜂類翅之拍翅頻率較大，飛行速率較快，而紋白蝶之拍翅頻率小( $9 \text{ s}^{-1}$ )，飛行速率較慢( $1.01 \pm 0.24 \text{ m/s}$ )。薛(民 91)書中提及，當昆蟲翅膀上拍速度慢時阻力較小，不過所帶來的尾流也較弱，因而無法在下拍時讓翼翅獲取強勁的尾流能量，以造成較大的瞬間升力。綜合實驗結果與文獻資料，推測蝴蝶可能因拍翅頻率較小，上拍速度慢，導致無法獲得足夠的尾流以增加飛行速率。

表六 各種昆蟲的飛行速度

|                                 | 飛行速率(m/s)       | 拍翅頻率( $\text{s}^{-1}$ ) | Ref           |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------|---------------|
| 紋白蝶                             | $1.01 \pm 0.24$ | 9                       | In this study |
| 牛虻( <i>Tabanus bovinus</i> )    | 14              |                         | 張書忱，民 68      |
| 蜻蜓( <i>Libellula depressa</i> ) | 4~10            | 280                     | 張書忱，民 68      |
| 家蠅                              | 2~2.3           | 180~197                 | 張書忱，民 68      |
| 圓花蜂(Bumble bee)                 | 3~5             | 220~240                 | 張書忱，民 68      |
| 蜜蜂                              | 2.5~3.7         | 180~203                 | 張書忱，民 68      |

五、當環境溫度愈高(5、16、23°C)時，蝴蝶飛行速率亦愈快( $y=0.07x+0.7733$ ， $R^2=0.6967$ )。風洞實驗發現：蝴蝶會逆風而飛，當風洞的風愈強，蝴蝶翅膀拍動角度大，且快而持久，仰角也變大(45度)，推測可能如此所造成的向上分力大，可使它輕易的起飛，另外亦發現到，當風洞的風持續一段時間後，蝴蝶雙翅會

合閉以減少強風造成的傷害。由此可知，當蝴蝶飛時受到外在環境的影響，如環境溫度、風速、風向的改變，蝴蝶會改變拍翅的頻率、振幅或身體的角度來影響其向上的浮力，以應付環境的改變(特別是風)。因此，未來微飛行器也可利用此種方式，來應付氣流的改變。

- 六、比較原始性昆蟲，如直翅目、等翅目、蜻蜓目，在飛行時前、後翅各自獨立運動，但鱗翅目(蝴蝶)昆蟲飛行時，前、後翅連接在一起，而形成一作用單位，以產生飛行所需的推力和升力。由於昆蟲無法像鳥類一樣將其翅膀彎曲摺起，因此轉動的方式與時機就成了影響升力的主要因素，研究觀察發現：蝴蝶之翼翅運動包含線性平移及旋轉，且翼尖軌跡呈八字形，因此推測，翼翅能在縱軸上扭轉，在高舉及下拍時產生傾斜之現象，產生類似推進器扇葉之機制。
- 七、由於紋白蝶會滑翔，因此我們製作蝴蝶模型以瞭解氣流方向及升力情形，並根據實際觀察及翅膀質地特性，將蝴蝶模型之前、後翅外緣(翅扇區)向上彎曲( $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ )，並置入風洞內測試。結果發現：翅緣彎曲角度(上反角)愈大，蝴蝶模型之上升高度亦愈高。但其中翅緣彎曲角度 $0^\circ$ 時，蝴蝶模型亦上升，推測可能是平行風使蝴蝶模型前半部向上抬升，並進而受一正向力之作用而使蝴蝶模型上升。

上反角就是當機翼擺正時翼前緣與水平線的夾角，大部分飛機都有上反角(圖三十一)，上反角可維持飛機滾轉的方向平衡(當飛機飛行時受到側向力，飛機傾向另一邊，上反角可負責修正回來)、幫助飛機轉向(很多小型遙控飛機沒有副翼，只有方向舵，但轉彎時一樣側傾後轉向，這是因為上反角的關係)、提高壓力中心(飛機機翼上反，壓力中心也提高，有助於穩定性)。我們於室內及風洞內觀察蝴蝶滑翔時，發現上反角確實有助於蝴蝶滑翔時的平衡，使滑翔更穩定。



圖三十一 具有上反角的飛機

- 八、微飛行器在軍事用途上極有價值，近年來美、日、歐先進國家正從事相關研究。但是微飛行器尺寸小、速度慢、重量輕，具有極大的空氣動力學與飛行力學上的挑戰。

由於蝴蝶的撲翼飛行(flapping fly)動作複雜，本研究初步探討蝴蝶身體重量、翅膀面積、展弦比、拍翅頻率及環境溫度對飛行速率之影響，並利用自製之風洞裝置分析氣流方向及相關氣動力的基本資料，希望日後能設計撲翼機構模擬蝴蝶飛行，進而進行試製和測試，來檢驗蝴蝶飛行的原理，並進一步探討其意義。

## 捌、結論

- 一、紋白蝶展翅約 4.5~5 cm，翅膀底色呈白色，前翅外緣有黑色斑紋，後翅外緣則無，此一特徵可與另一類似種台灣紋白蝶(*Pieris canidia*)區分。
- 二、紋白蝶翅膀具有半透明翅膜和交錯縱橫的翅脈，前翅翅脈具有亞前緣脈(Sc)一條、徑脈(R)五條( $R_1 \sim R_5$ )、中脈(M)三條( $M_1 \sim M_3$ )、肘脈(Cu)兩條( $Cu_1$ 、 $Cu_2$ )、臀脈(A)兩條(2A、3A)。而後翅翅脈具有亞前緣脈+徑脈( $Sc + R_1$ )一條，徑脈( $R_5$ )一條，中脈(M)三條( $M_1 \sim M_3$ )，肘脈(Cu)兩條( $Cu_1$ 、 $Cu_2$ )，臀脈(A)兩條(2A、3A)。
- 三、鳳蝶科、蛺蝶科及蛇目蝶科的最上長度大多大於最下長度，且蛺蝶科的最上長度和最下長度相差較大。由對角線長來看，鳳蝶科算是較大型的蝴蝶，而紋白蝶屬於中型的蝴蝶。
- 四、紋白蝶的平均展弦比(AR)為  $1.71 \pm 0.12$ ，身體重量約為  $0.06 \pm 0.02$  g，翅膀面積約  $0.0012 \pm 0.0003$  m<sup>2</sup>，當紋白蝶身體重量愈重，則翅膀面積亦愈大。
- 五、紋白蝶展弦比愈小、身體重量愈重，則飛行速度亦愈快。
- 六、23°C 時，紋白蝶飛行速率為  $1.01 \pm 0.24$  m/s，當環境溫度愈高(5、16、23°C)，則飛行速度亦愈快。
- 七、蝴蝶翼尖軌跡呈八字形，蝴蝶拍翅時，前、後翅連接在一起，而形成一作用單位，以產生飛行所需的推力和升力。翼翅運動包含線性平移及旋轉，因此，翼翅能在縱軸上扭轉，在高舉及下拍時產生傾斜之現象，類似推進器扇葉之機制。蝴蝶拍翅時，可在翅上方及前方產生低壓帶，在後方產生高壓帶，以利蝴蝶向前方飛行。
- 八、翅緣彎曲角度愈大，蝴蝶模型之上升高度亦愈高，當彎曲角度 60° 時，蝴蝶模型之上升高度最高( $2.2 \pm 0.1$ cm)。



## 玖、參考文獻

### (一)期刊論文

- 1.王效岳、白九維 (民 92) **中國斑蝶圖說(二)**，台灣博物，22(1)，28-41。
- 2.宋齊有 (民 91) **微飛行系統相關之力學問題**，中華民國力學學會會訊，100，2-5。
- 3.程暮林 (民 90) **昆蟲的振翅飛行原理研究進展**，北京大學君政學者論文集。
- 4.湯奇霖、劉迴錫、趙仁方 (民 90) **台東縣卑南鄉大南部落之蝶類相初步調查研究**，台東文獻，6，15-29。
- 5.薛嘉賢 (民 91) **仿昆蟲拍翅飛行載具之轉翅時機實驗研究**，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文。

### (二)圖書書籍

- 1.<http://www.ornithopter.org/store/teacherguide.pdf>
- 2.小林昭夫 (民 92) **飛機的構造與原理**，世茂圖書公司。
- 3.張書忱 (民 68) **昆蟲型態學**，台北：黎明文化事業股份有限公司。
- 4.廖智安 (民 88) **台灣昆蟲記—賞蟲大圖鑑**，台北：大樹文化事業股份有限公司。
- 5.關崇智 (民 81) **昆蟲生理學精要**，台中：興大書齋。