

臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

科 別：工程學

作 品 名 稱：大自然的飛行家--蝴蝶飛行之初部探討

得 獎 獎 項：佳作

學校 / 作者：國立台東女子高級中學
國立台東女子高級中學

張亦凡
謝璧鴻

作者簡介及照片



我是來自台東的張亦凡，由於從小生長在鄉下的淨土，自幼就喜歡和小動物們做朋友，小時候，常常會帶幾隻紋白蝶、蚱蜢、天牛等等的小動物回家養，家裡也養過小鳥、小狗、魚和小兔子等等的動物，等於是從小就在「動物園」裡長大的！上了高中以後，也許是受環境的影響，特別喜歡生物課，尤其到了高二，生物課更是很好的成績！也因為對生物的喜愛，參加了科展，想利用科展更深入的了解其他生物運動的方式，以後說不定有人會參考我們的研究，利用現在發達的科技發明新的東西造福全人類。

在學校，藝術、音樂和英文也是我在行的科目之一，我也是合唱的一員，平常也喜歡玩玩樂器，英文方面去年已經通過英檢中級，今年五月即將向中高級邁進！

作者簡介及照片



姓名：謝璧鴻

我出生在有山好水，接近大自然的台東，也因為如此，喜歡上生物，總覺得生物是非常奇妙的，為甚麼一個小小的細胞能夠造就一段偉大的生命呢？而身體裡的種種構造使得生命得以延續，所以我不斷對生物的種種現象感到驚嘆，希望能夠深入探討，未來可以研讀這相關的科系，而我平常也喜歡聽音樂，是學校管樂團的一員，藉由音樂的陶冶，使我在忙碌的課業下，能夠調節身心，得到一種充實的快樂。

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 ± 0.12 ，身體重量約為 0.06 ± 0.02 g，翅膀面積約 0.0012 ± 0.0003 m²，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 ± 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 ± 0.1 cm)。

Abridgement

TOPIC : The pilot of Mother Nature-butterfly' s flying ability

This research approaches the flying ability of butterflies. Our research mainly discusses the weight, aspect - ratio of butterflies, frequency of flapping, and the shape, surface area of butterflies' wings, and the connection between temperature and flying velocity. More over, we use the wind tunnel which was made by us to observe the movement of butterflies' wings and analyzed the direction of airflow and aero-elastic which pass through the wind tunnel.

Our research shows that *Pieris canidia*' s length of wings is about 4.5 to 5 cm. The average of aspect - ratio (AR) is 1.71 ± 0.12 . Its weight is about 0.06 ± 0.02 . And its surface area is about $0.0012 \pm 0.0003 \text{ m}^2$. The heavier *Pieris canidia* is, the bigger its surface area will be ($R^2 = 0.9586$). In addition, the heavier it is, the smaller its aspect - ratio will be ($R^2 = 0.5559$, $R^2 = 0.4726$), and the swifter its flying velocity will be. When it is 23°C , the flying velocity of *Pieris canidia* is $1.01 \pm 0.24 \text{ m/s}$. The hotter temperature is ($5, 16, 23^\circ\text{C}$), the swifter it flies ($y = 0.07x + 0.7733$, $R = 0.6967$).

Accroding to the detect of the wind tunnel' s experiment , the butterflies will fly on luff. When the stronger the wind of the wind tunnel is, the larger the angles of wing' s flap are. And they are fast and lasting, the elevation also becomes larger (45°). The butterflies' trochoids of wings mimic the word "eight" , and the movement of wingspan includes parallel movement of linearity and wheel. When butterflies flap, it will amount depression upon and in front of the wings, amounting the high pressure on the back so that butterflies can fly antrorsely. Furthermore, the larger the curvy angle of marginal wings (Dihedral) is, the higher the ascending height of model butterfly will be. When dihedral is 60° , the ascending height of model butterfly is the highest ($2.2 \pm 0.1 \text{ cm}$).

目錄

中文摘要	1
英文摘要	2
目錄	3
壹、研究動機	4
貳、文獻探討	4
參、研究目的	8
肆、研究設備及器材	8
伍、研究過程與方法	11
陸、研究結果	14
柒、討論	22
捌、結論	24
玖、參考文獻	25

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---動物的行爲
高二物質科學物理篇(下) 第十章第三節---流體力學

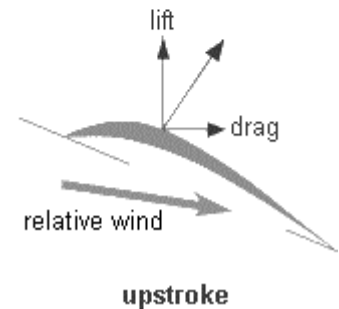
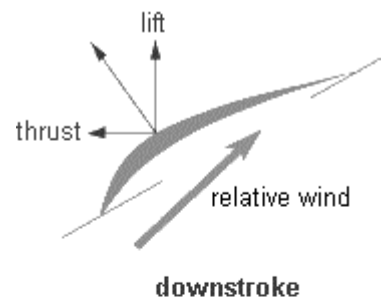
貳、文獻探討

一、流體力學

1.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。

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

2.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)

1.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(Aспект-Ratio, AR)均較小($AR \sim 1$)，目前試飛成功之微飛行器設計大多屬於此類。

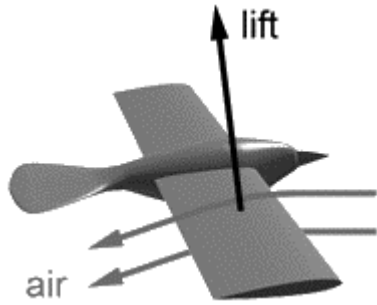
2.旋翼微飛行器

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。

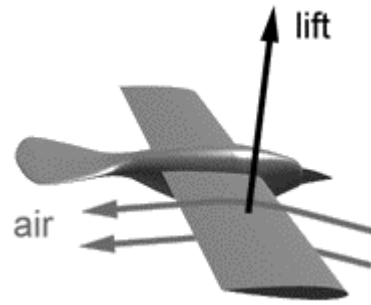
圖一 固定翼微飛行器之升力產生與推進方式

3.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.

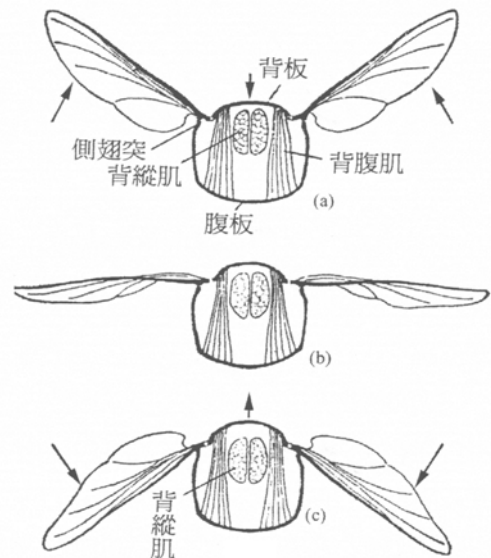
三、昆蟲的飛行

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



需的推力和升力

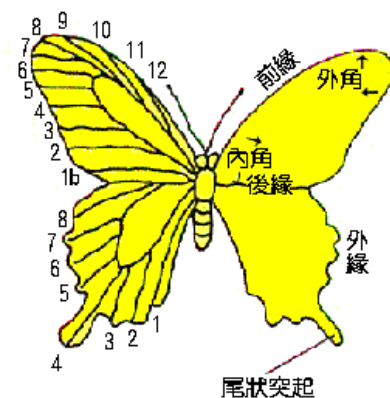
生足夠的升力。蜜蜂、蜻蜓等昆蟲，拍翅方式則大多是 8 字形拍法，從側面來看，翅兩端的拍動軌跡是沿著我們寫 8 這個數字的筆順。而蜂鳥及蒼蠅的拍動軌跡是橫躺的 8 字型，如同符號∞，尤其是停懸在空中時。(張書忱，民 68)。

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：

1. 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)	

2. 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)。

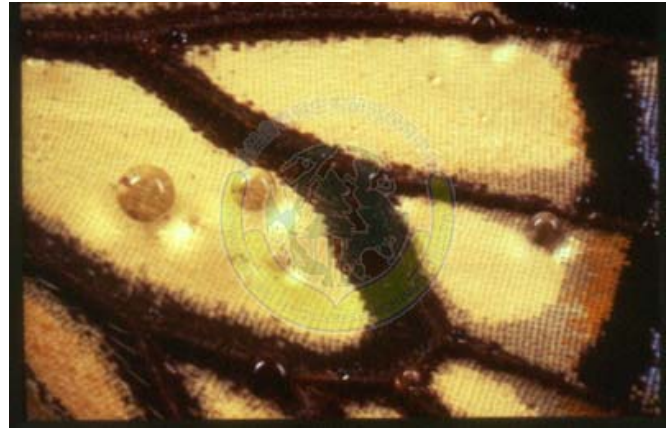
3.鱗片

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

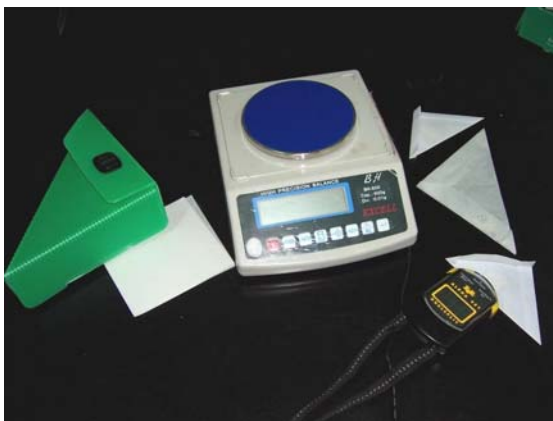
參、研究目的

- 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	儀器設備	數量
光學顯微鏡(Olympus NO.100)	1 台	三角袋	2 包
立體解剖顯微鏡	1 台	飼養箱(200cm×100cm×150cm)	1 個
數位照相機(FUJIFILM FinePix 6900)	1 台	蝴蝶觀察箱(15cm×10cm×15cm)	1 個
顯微照相機(Nikon FM2)	1 台	二氧化錳(MnO ₂)、雙氧水(H ₂ O ₂)	
風速計(Lutron LM-81AM)	1 台	保麗龍箱、冰塊、食鹽、溫度計	
電子天平	1 台	燈泡、直尺、皮尺、碼錶	
自製風洞(112cm×38cm×38cm)	1 台	保麗龍板、切割器、油性筆	



圖八 電子天平、三角袋、碼錶

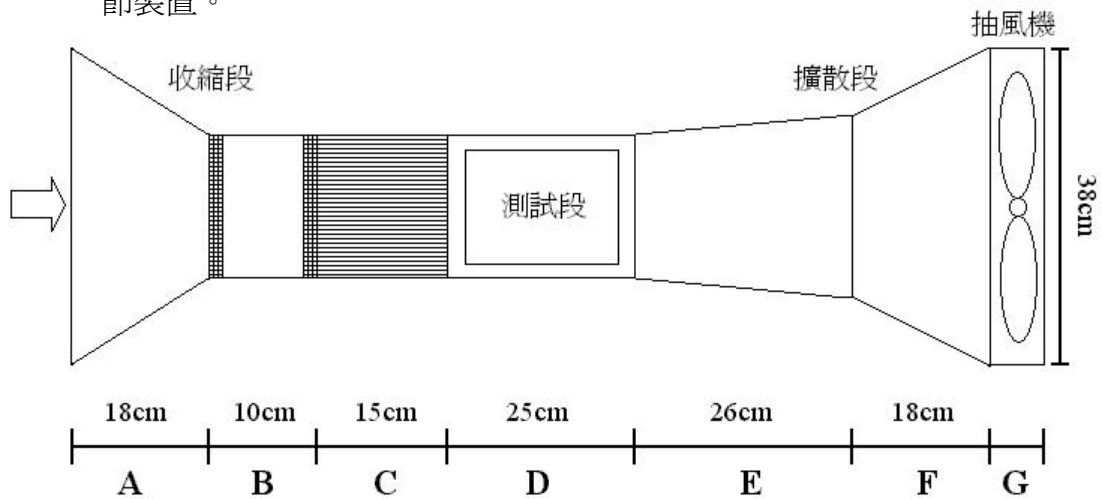


圖九 保麗龍箱、冰塊、食鹽、溫度計

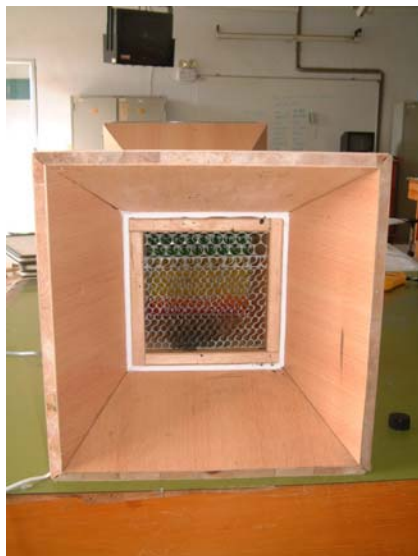
二、實驗設備製作

1.風洞製作

- a.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)。
- b.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

2. 蝴蝶模型製作

- 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。
- 找出蝴蝶模型之重心後，在模型上打一個 0.4cm 的洞。
- 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° 、 30° 、 60° 及 90° 之上反角(圖十四)。

伍、實驗過程與方法

一、蝴蝶採集與飼養

- 1.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。
- 2.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。
- 3.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

- 1.利用立體解剖顯微鏡觀察紋白蝶翅膀之鱗片，繪圖並拍照。
- 2.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

- 1.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)。
- 2.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。
- 3.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^2)。

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

- 4.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

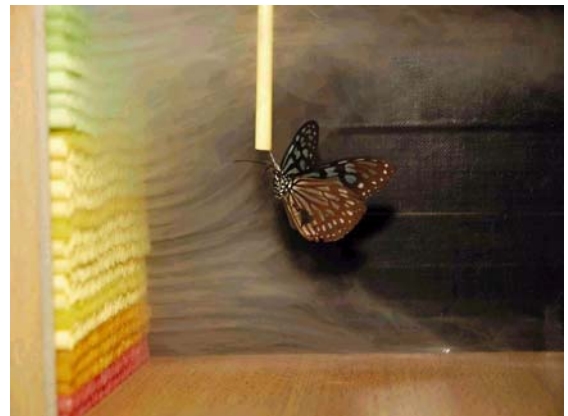
- 1.將實驗室門窗緊閉並關閉風扇，挑選十隻已編號之紋白蝶，於室溫下(23°C)分別在實驗室內同一釋放點放飛並計時，以紋白蝶第一個碰觸點為停止點，用皮尺測量其飛行距離，每隻紋白蝶皆六重複後，計算其平均飛行速率(cm/s)。
- 2.取二個保麗龍箱裝置如下：
 - T2：保麗龍箱內放置溫度計，放入冰塊後，調整箱內溫度至 16°C。
 - T3：保麗龍箱內放置溫度計，放入冰塊、氯化鈉後，調整箱內溫度至 5°C。
- 3.挑選十隻已編號之紋白蝶，放入 T2 保麗龍箱內，於 60 秒後取出，分別在實驗室同一釋放點放飛並計時，以紋白蝶第一個碰觸點為停止點，用皮尺測量其飛行距離，每隻紋白蝶皆三重複後，再放入 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)。
- 4.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

- 1.觀察蝴蝶之翼翅運動及氣流方向
 - a.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。
 - b.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。
 - c.在風洞收縮段前，以濃雙氧水(H₂O₂)倒入二氧化錳(MnO₂)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

2.不同翅緣彎曲角度(上反角)對氣流方向、升力之影響

- a.於風洞測試段底部放置一支架，支架上以油性筆標記刻度。
- b.蝴蝶模型之重心穿過支架後，平放於測試段底部。
- c.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。
- d.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° 、 30° 、 60° 、 90°)各實驗 5 次
- e.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。

1.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。

2.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*)



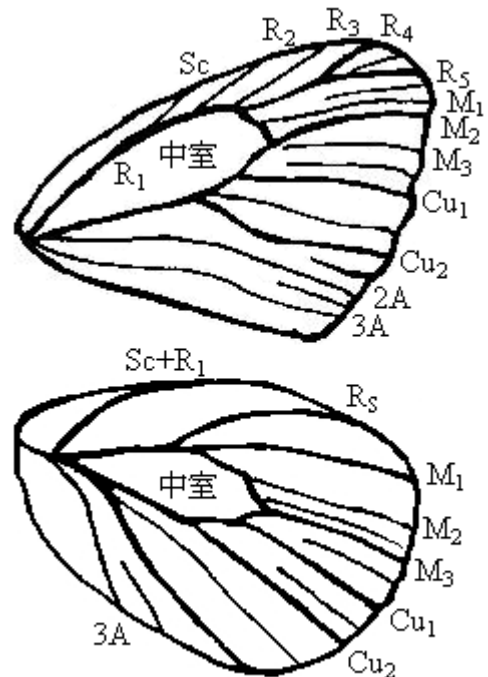
圖二十一 台灣紋白蝶(*Pieris canidia*)

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(R₁~R₅)，中脈(M)三條(M₁~M₃)，肘脈(Cu)兩條(Cu₁、Cu₂)，臀脈(A)兩條(2A、3A)。

後翅翅脈：具有亞前緣脈+徑脈(Sc+R₁)一條，徑脈(R_s)一條，中脈(M)三條(M₁~M₃)，肘脈(Cu)兩條(Cu₁、Cu₂)，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 ± 0.41 cm，最下長度約 4.10 ± 0.55 cm，對角線長約 4.84 ± 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(cm)	最下長度(cm)	最上長度/ 最下長度	對角線長(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

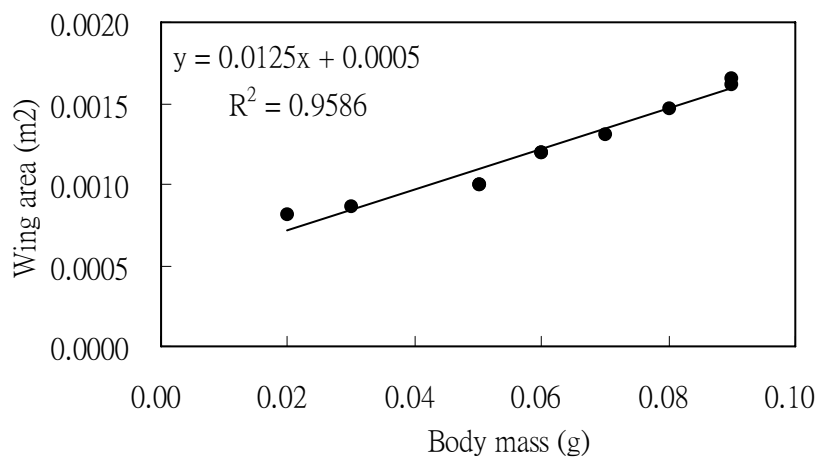
中名	最上長度(cm)	最下長度(cm)	最上長度/ 最下長度	對角線長(cm)
台灣黃斑蛺蝶	6.0	1.5	4.00	5.3
黃斑蛺蝶	5.0	1.7	2.94	6.8
雙尾蛺蝶	8.3	4.6	1.79	10.2
姬雙尾蛺蝶	7.7	4.8	1.62	9.2
紅蛺蝶	4.8	1.9	2.53	5.3
琉球紫蛺蝶	5.5	2.0	2.75	6.5
孔雀蛺蝶	4.3	1.3	3.31	4.6
孔雀青蛺蝶	4.6	1.5	3.07	4.6
黑端豹斑蝶	5.8	2.0	2.90	6.6
台灣小紫蛺蝶	5.2	1.6	3.25	6.4
枯葉蝶	5.2	2.2	2.32	9.1
紫單帶蛺蝶	5.6	2.2	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(cm)	最下長度(cm)	最上長度/ 最下長度	對角線長(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

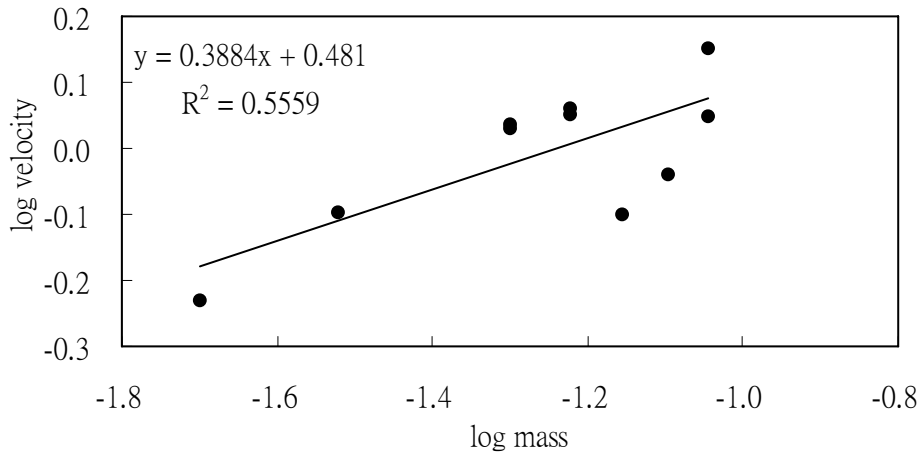
圖二十三為紋白蝶身體重量(g)與翅膀面積(m²)之關係曲線，紋白蝶的身體重量約為 0.06 ± 0.02 g，翅膀面積約 0.0012 ± 0.0003 m²。由結果顯示：當紋白蝶身體重量愈重，則翅膀面積亦愈大，兩者呈良好的線性關係(R²=0.9586)。



圖二十三 紋白蝶身體重量(g)與翅膀面積(m²)之關係曲線

五、身體重量對紋白蝶飛行速率之影響

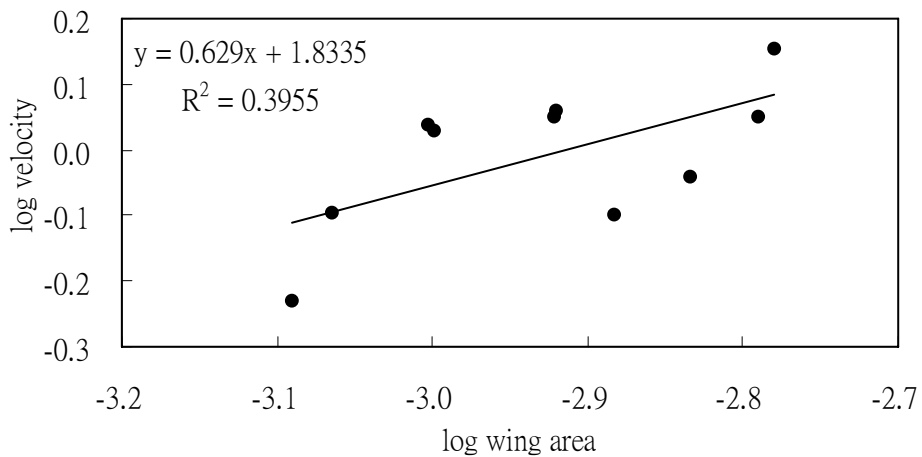
圖二十四為紋白蝶身體重量(g)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 23°C 下)。由結果顯示，當紋白蝶身體重量愈重，則飛行速率亦愈快，兩者呈中度相關($R^2=0.5559$)。



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

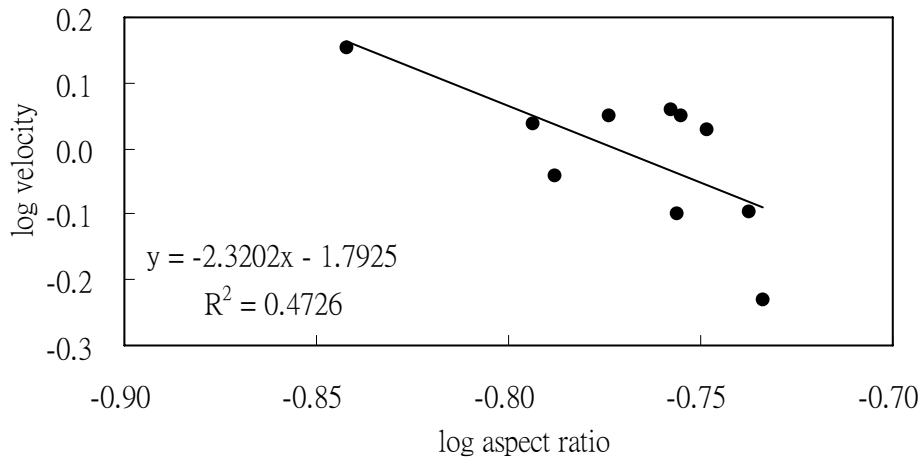
圖二十五為紋白蝶翅膀面積(m^2)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 23°C 下)。由結果顯示，紋白蝶翅膀面積與飛行速率，兩者呈中度相關($R^2=0.3955$)。



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

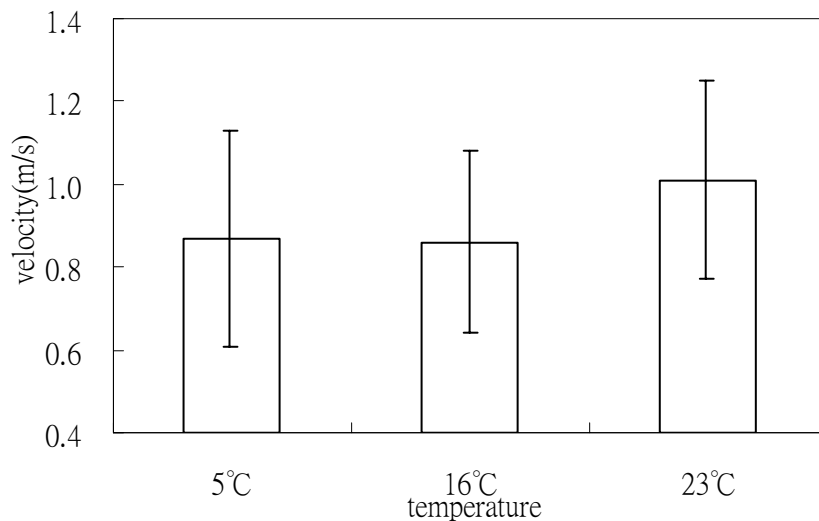
圖二十六為紋白蝶展弦比(AR)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 23°C 下)，紋白蝶的平均展弦比(A Aspect-Ratio, AR)為 1.71 ± 0.12 。由結果顯示，當展弦比(AR)愈小，則紋白蝶飛行速率亦會較快，兩者呈中度相關($R^2=0.4726$)。



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

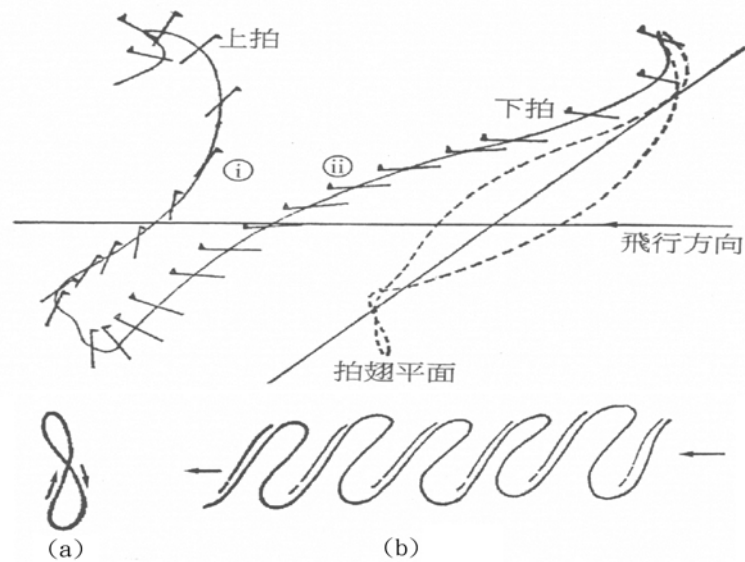
圖二十七為環境溫度與紋白蝶飛行速率(m/s)之關係圖。由結果顯示，5°C 時，紋白蝶飛行速率為 0.87 ± 0.26 m/s，16°C 時，紋白蝶飛行速率為 0.86 ± 0.22 m/s，而 23°C 時，紋白蝶飛行速率增加為 1.01 ± 0.24 m/s。即當環境溫度愈高，則飛行速度亦愈快，環境溫度與飛行速率之關係呈中度相關($y=0.07x + 0.7733$ ， $R^2=0.6967$)。



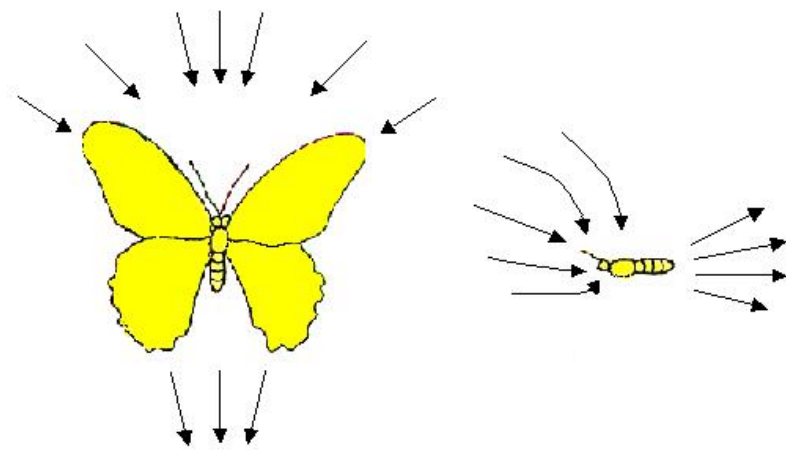
圖二十七 不同溫度(5°C、16°C、23°C)下，紋白蝶之飛行速率(m/s)

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)。



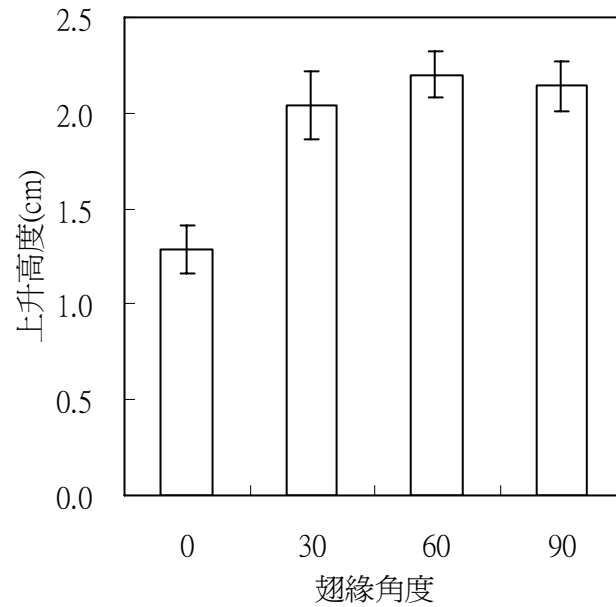
圖二十八 上下拍撲平移轉動模式



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 ± 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 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(s^{-1})	Ref
紋白蝶	1.01 ± 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° 、 30° 、 60° 、 90°)，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° 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 ± 0.12 ，身體重量約為 0.06 ± 0.02 g，翅膀面積約 0.0012 ± 0.0003 m²，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 ± 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 ± 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。

評語

1. 能從校園身旁事物發想，進而進行系統化的研究，是相當值得鼓勵的。
2. 利用儘量不影響及傷害蝴蝶的方式作實驗，但須注意其固定方式與對蝴蝶模型固定方式不相同。
3. 蝴蝶出現於春夏，所以對溫度的控制應在 15~35°C 較合理。
4. 透過本作品對變數的探討，可以對飛行裝置得到初步的理解，但各參數與飛行效果的關係應該是可以進一步深入探討的部分。