

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 生活與應用科學科

第三名

040812

大自然的飛行家—蝴蝶飛行之初步探討

國立台東女子高級中學

作者姓名：

高二 林巧曦 高二 游舒淳 高二 呂雨蓉
高二 陳盈如

指導老師：

謝建智 陳淑惠

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

科 別：應用科學科

組 別：高中組

作品名稱：大自然的飛行家--蝴蝶飛行之初步探討

關 鍵 詞：蝴蝶、飛行速率、展弦比

編 號：

目錄

目錄.....	1
摘要.....	2
壹、研究動機.....	3
貳、研究目的.....	3
參、研究設備及器材.....	3
肆、研究過程與方法.....	6
伍、研究結果.....	9
陸、討論.....	14
柒、結論.....	16
捌、參考文獻.....	17

大自然的飛行家--蝴蝶飛行之初步探討

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、環境溫度及溼度對飛行速率之影響，並利用自製之風洞裝置，觀察蝴蝶之拍翅動作，分析通過蝴蝶模型之氣流方向及相關力量。

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，則翅膀面積亦愈大。另外，紋白蝶展弦比愈小、身體重量愈重或翅膀面積愈大，則飛行速度亦愈快。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。風洞實驗發現：蝴蝶拍翅時，前、後翅連接在一起，而形成一作用單位。翅膀上下運動時，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。另外，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)。

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、研究目的

- 一、觀察紋白蝶翅膀之外形、翅脈及鱗片。
- 二、探討翅膀形狀、身體重量、翅膀面積、展弦比及拍翅頻率對蝴蝶飛行速率之影響。
- 三、探討環境溫度、溼度對蝴蝶飛行速率之影響。
- 四、利用自製之風洞裝置，觀察蝴蝶之拍翅動作，分析通過蝴蝶模型之氣流方向及相關力量。

參、研究設備及器材

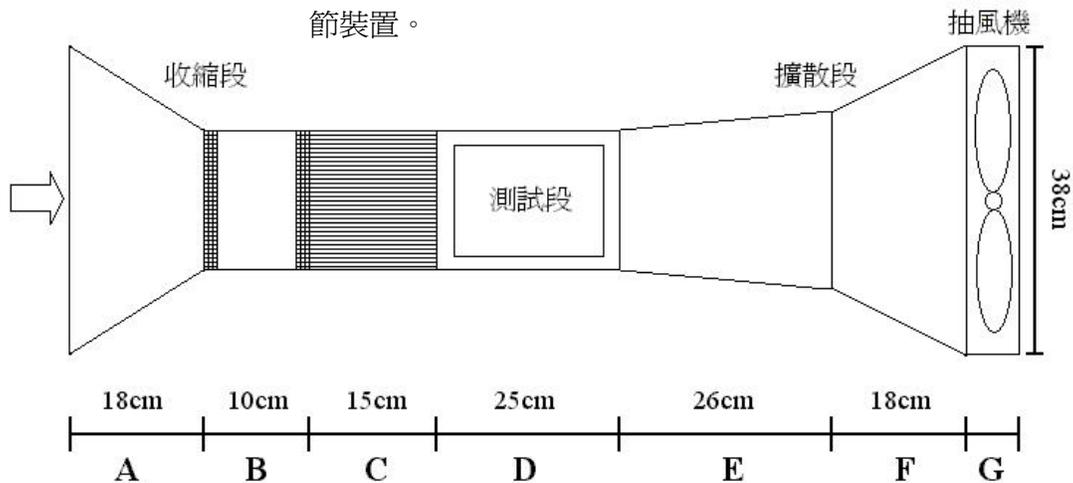
一、實驗器材

儀器設備	數量	儀器設備	數量
光學顯微鏡(Olympus NO.100)		三角袋	2 包
立體解剖顯微鏡	1 台	蝴蝶飼養箱(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	食鹽(NaCl)、保麗龍箱、冰塊、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	

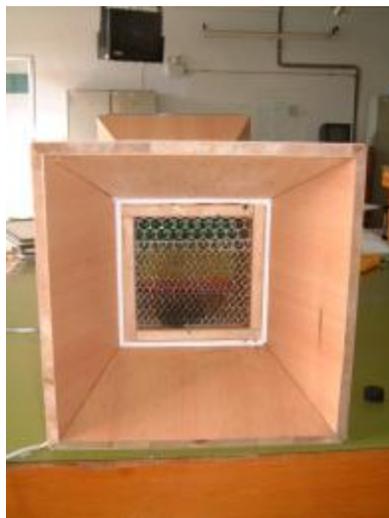
二、實驗設備製作

(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)(圖四)。
- 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(圖一)：
 - (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)(圖二)。
 - (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(圖三)。
 - (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。



圖一 風洞設計圖



圖二 收縮段(A)及第一整流段(B)



圖三 第二整流段(C)及測試段(D)



圖四 自製之風洞裝置



圖五 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° 、 30° 、 60° 及 90° 之角度(圖五)。

肆、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(圖六、七)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。



圖六 採集蝴蝶之大南國小校園



圖七 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(m²)。

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

- (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，放入適當冰塊後，調整箱內溫度至 16°C。

T3：保麗龍箱內放置溫度計，放入適當冰塊、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、不同溼度下對紋白蝶飛行速率之影響

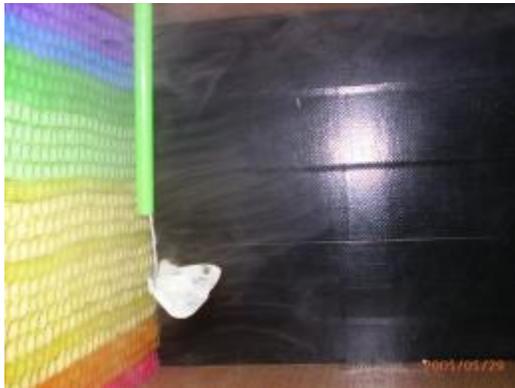
(一)挑選十隻已編號之紋白蝶及其它種類的蝴蝶。將 2 cc 的蒸餾水倒入噴水器後，在距離蝴蝶約 20~30 公分處噴灑其翅膀，直到噴水器中的水用盡。分別在實驗室內同一釋放點放飛並計時，以其第一個碰觸點為停止點，用皮尺測量其飛行距離，每隻蝴蝶皆六重複後，計算其平均飛行速率(cm/s)。

(二)分別改變蒸餾水量為 4、6、8 及 10 cc，重複步驟 1，計算其平均飛行速率(cm/s)。

六、風洞實驗

(一)觀察蝴蝶之拍翅動作及氣流方向

- 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(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翅膀的情形(圖八、九)。



圖八 觀察紋白蝶之拍翅動作



圖九 觀察青斑蝶之拍翅動作

(二)不同翅緣彎曲角度對氣流方向、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°、30°、60°、90°)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)。



圖十 觀察蝴蝶模型之氣流方向及升力情形

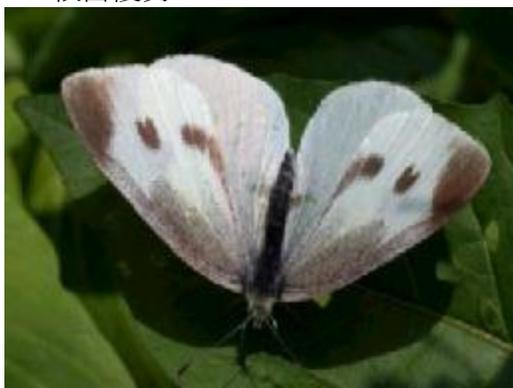
伍、研究結果

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(圖十一、十二)。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較占優勢，而城市及山區中則以台灣紋白蝶較占優勢。



圖十一 紋白蝶(*Pieris rapae crucivora*)



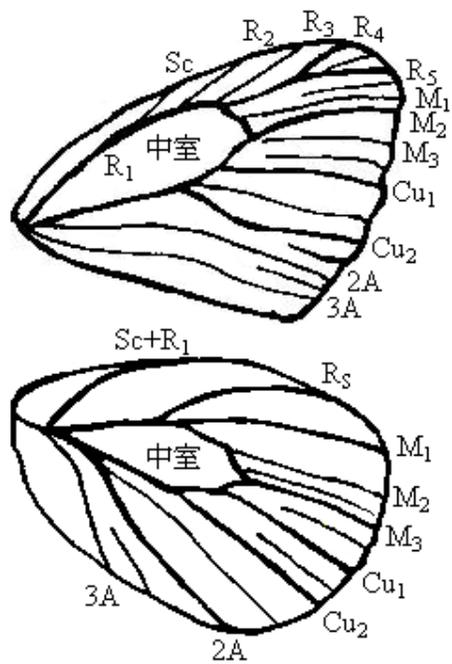
圖十二 台灣紋白蝶(*Pieris canidia*)

二、紋白蝶翅膀之觀察

紋白蝶翅脈之觀察結果如下(圖十三)：

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(R₅)一條，中脈(M)三條(M₁~M₃)，肘脈(Cu)兩條(Cu₁、Cu₂)，臀脈(A)兩條(2A、3A)。



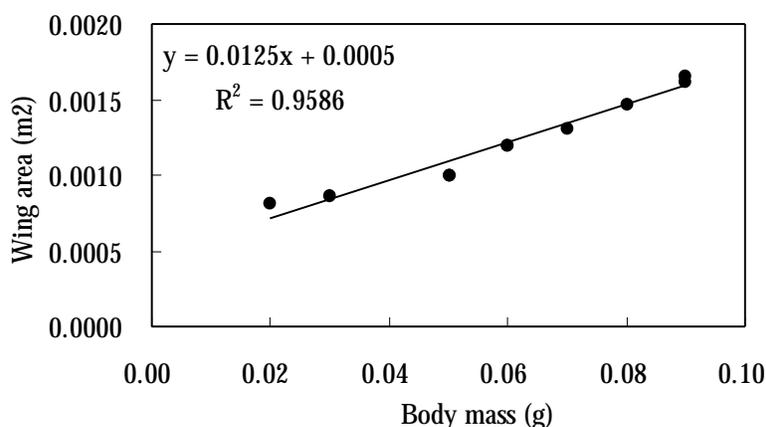
圖十三 紋白蝶之前、後翅翅脈

三、前後翅長度之測定

測量結果顯示：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。

四、身體重量與翅膀面積之關係

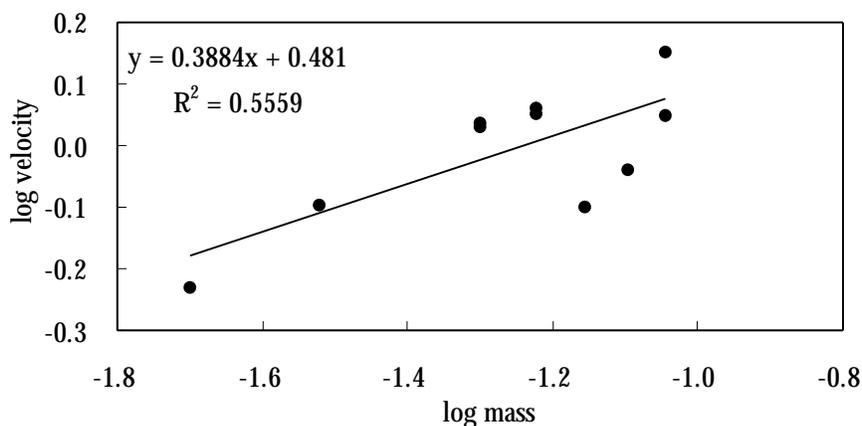
圖十四為紋白蝶身體重量(g)與翅膀面積(m²)之關係曲線，紋白蝶的身體重量約為 0.06 ± 0.02 g，翅膀面積約 0.0012 ± 0.0003 m²。由結果顯示：當紋白蝶身體重量愈重，則翅膀面積亦愈大，兩者呈良好的線性關係($R^2=0.9586$)。



圖十四 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

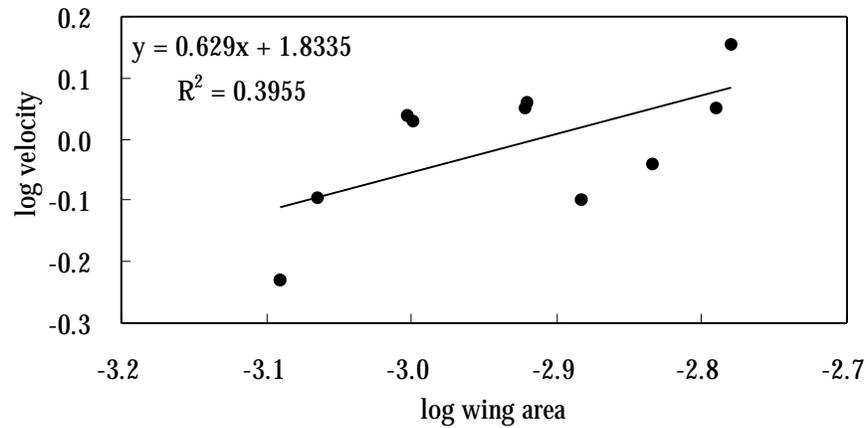
圖十五為紋白蝶身體重量(g)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 23°C下)。由結果顯示，當紋白蝶身體重量愈重，則飛行速度亦愈快，兩者呈中度相關($R^2=0.5559$)。



圖十五 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

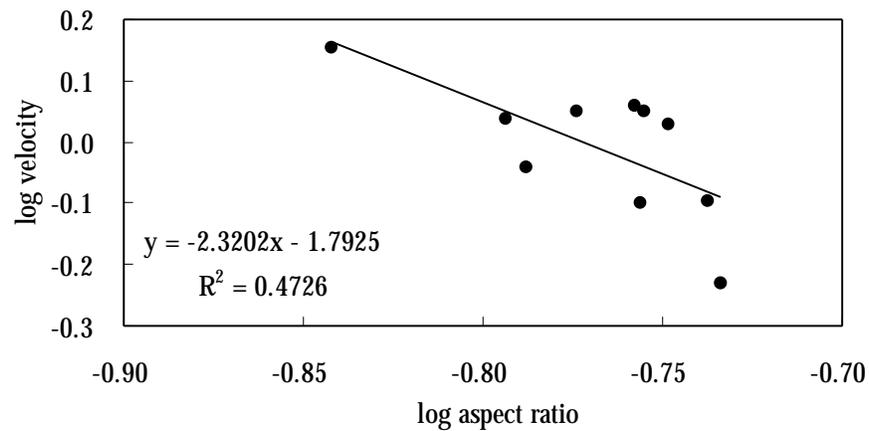
圖十六為紋白蝶翅膀面積(m^2)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 $23^{\circ}C$ 下)。由結果顯示，當紋白蝶翅膀面積較大，則飛行速度亦會較快，兩者呈中度相關($R^2=0.3955$)。



圖十六 紋白蝶翅膀面積(m^2)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 $23^{\circ}C$ 下)

七、展弦比對紋白蝶飛行速率之影響

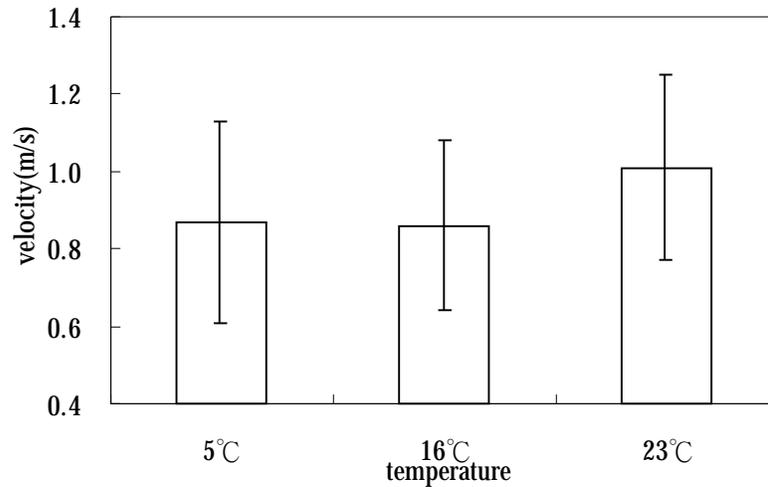
圖十七為紋白蝶展弦比(AR)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 $23^{\circ}C$ 下)，紋白蝶的平均展弦比(Aspect-Ratio, AR)為 1.71 ± 0.12 。由結果顯示，當展弦比(AR)愈小，則紋白蝶飛行速率亦會較快，兩者呈中度相關($R^2=0.4726$)。



圖十七 紋白蝶展弦比(AR)與飛行速率(m/s)之關係曲線(室溫 $23^{\circ}C$ 下)

八、環境溫度對紋白蝶飛行速率之影響

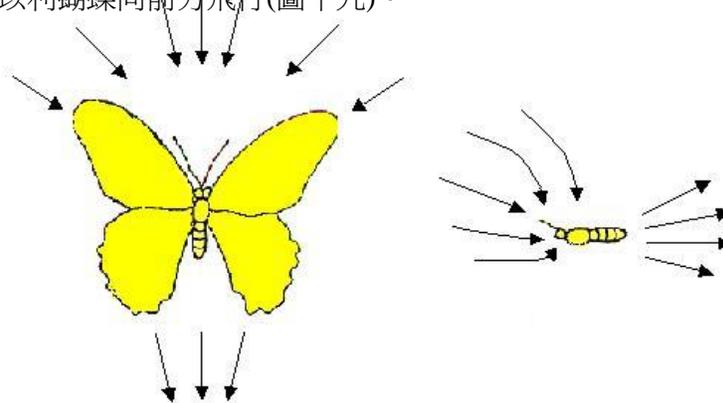
圖十八為環境溫度與紋白蝶飛行速率(m/s)之關係圖。由結果顯示，5°C時，紋白蝶飛行速率為 0.87 ± 0.26 m/s，16°C時，紋白蝶飛行速率為 0.86 ± 0.22 m/s，而 23°C時，紋白蝶飛行速率增加為 1.01 ± 0.24 m/s。即當環境溫度愈高，則飛行速度亦愈快，環境溫度與飛行速率之關係呈中度相關($y=0.07x + 0.7733$ ， $R^2=0.6967$)。



圖十八 不同溫度(5°C、16°C、23°C)下，紋白蝶之飛行速率(m/s)

九、蝴蝶之拍翅動作及氣流方向

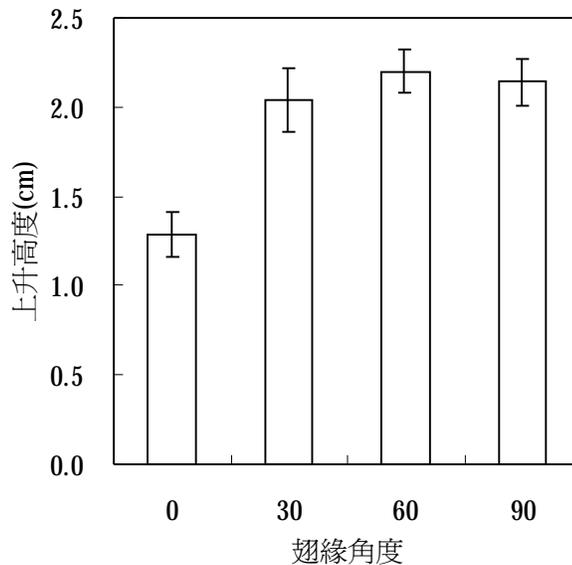
- (一)於風洞測試段觀察蝴蝶之拍翅動作發現，蝴蝶拍翅時，前、後翅連接在一起，而形成一作用單位，以產生飛行所需的推力和升力。翅膀上下運動時，翅能在縱軸上扭轉，在高舉及下拍時產生傾斜之現象，類似推進器扇葉之機制。
- (二)觀察蝴蝶拍翅之氣流方向發現，可在翅上方及前方產生低壓帶，在後方產生高壓帶，以利蝴蝶向前方飛行(圖十九)。



圖十九 蝴蝶拍翅之氣流方向(風速 3m/s)

十、不同翅緣彎曲角度對氣流方向、升力之影響

圖二十為在固定風速(3m/s)下，不同翅緣彎曲角度與蝴蝶模型上升高度(cm)之關係圖。結果顯示：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±0.1cm)。



圖二十 不同翅緣彎曲角度時(風速 3m/s)，蝴蝶模型之上升高度

陸、討論

- 一、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。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，本研究採用康尼氏翅脈命名法(表一)。

表一 蝴蝶之翅脈(康尼氏翅脈命名法)

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)	

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(R₁)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、蝴蝶的翅上覆蓋許多細小的鱗片，這些鱗片具有保護翅的功能，且可以防水使翅不會潮濕，我們發現蝴蝶翅上的花紋就是這些不同顏色的鱗片所組成的。另外，蓋在蝴蝶翅膀上的鱗片亦可幫助翅膀和外環境絕緣，同時飛行時可幫助保持高溫(關崇智，民 81)。
- 三、由研究結果發現，通常展弦比(AR)愈大，滑翔愈好，展弦比越小，速率愈快。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 。另外，當紋白蝶身體重量愈重，則飛行速度亦愈快，且兩者呈中度相關，因此在身體重量和蝴蝶的飛行速率間取捨合宜，才是最佳的飛行。

四、一般翅形較窄之昆蟲，其翅之震幅較短，拍翅頻率較大，飛行較快，而翅形較寬之昆蟲，其翅之震幅較大，拍翅頻率較小，飛行較慢。一般來說，以蠅類和蜜蜂類翅之拍翅頻率較大，飛行速率較快(表二)，而紋白蝶之拍翅頻率小(9 s^{-1})，飛行速率亦較慢($1.01\pm 0.24\text{ m/s}$)。

昆蟲的拍翅頻率亦會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)。

表二 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、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，但蝴蝶飛行時前、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。

六、由於紋白蝶亦會滑翔，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：翅緣彎曲角度愈大，蝴蝶模型之上升高度亦愈高，與白努力方程式相符(在一水平面上流動的流體，其流速越快，則流體的壓力越小)。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。

七、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(宋齊有，2002)。而拍撲翼微飛行器為三類中較特殊且更為複雜者，此種飛行器在自然界中可仿效之對象極多，如各種昆蟲、鳥類等均利用其翅膀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。

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力量的基本資料，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。

柒、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(R₁~R₅)、中脈(M)三條(M₁~M₃)、肘脈(Cu)兩條(Cu₁、Cu₂)、臀脈(A)兩條(2A、3A)。而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)。
- 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、身體重量愈重或翅膀面積愈大，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、蝴蝶拍翅時，前、後翅連接在一起，而形成一作用單位。翅膀上下運動時，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)。

捌、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.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。

(二)圖書書籍

- 1.<http://www.ornithopter.org/store/teacherguide.pdf>
- 2.張書忱 (民 68) **昆蟲型態學**，台北：黎明文化事業股份有限公司。
- 3.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。
- 4.關崇智 (民 81) **昆蟲生理學精要**，台中：興大書齋。

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
評 語

高中組 生活與應用科學科

第三名

040812

大自然的飛行家—蝴蝶飛行之初步探討

國立台東女子高級中學

評語：

本作品取材於日常，且與飛行動力息息相關。研製小型風洞，進行多樣性實驗成果與報告均佳。建議事項包括(1)空氣動力參數之選取，宜獨立完備。重要參數如攻角及側向穩定，不妨列入考量；(2)數據之處理與製圖，宜注意代表曲線與實際數據之貼切程度；(3)結論之淬取可就關鍵原理原則，及本質特徵加以深化。表象的結論，意涵深度略嫌不足。