

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生物科

第三名

030316

滑翔的舞姬—解析大白斑蝶驚艷飛行

學校名稱：新北市立義學國民中學

作者： 國二 鄭樂晨	指導老師： 陳又君 陳俊仁
---------------	---------------------

關鍵詞：大白斑蝶、翼型、棲地適應

摘要

本研究以流體力學的角度，透過仿生模型，評估蝴蝶型態構造的差異，在生物演化適應上的意義。

觀察大白斑蝶 (*Idea leuconoe*) 的滑翔運動，並與同屬之 *Idea stolli* 比較。發現 *Idea stolli* 的滑翔能力較 *I. leuconoe* 佳，因 *I. stolli* 擁有更細長的前翅，即更高的展弦比，可減少誘導阻力，所以飛行效率更高，滯空時間更長。調整前翅角度比較升阻比，再與實際蝴蝶滑翔的姿勢比較，發現蝴蝶確實是以最佳姿勢來達成最有效率的滑翔。

研究發現翅膀型態上的差異，是生物演化適應環境的結果。依其棲地特色，推論棲息於風勢較亂之海岸的 *I. leuconoe*，演化出較為短小渾圓，抗風性佳的翅膀，適應海岸棲地；而棲息於內陸次生林的 *I. stolli* 則演化成更為細長的翅膀形狀，更利於在穩定的環境中，發揮極盡的滑翔能力。

壹、研究動機

個人對於飛行因為有極大興趣和好奇，平時非常喜愛製作各式各樣的飛行器模型，有一回在生態農場觀察大白斑蝶飛行時，看牠們鼓動翅膀升空，繼之悠閒滑翔而下的飛行方式，更是讓我興奮不已！許多生物以乘風滑翔方式省力飛行於廣大的天空，是經過幾千萬年的演化和擇優汰劣而來。其靈活性、滯空性之效率都是當今航空器無法比擬的，當中必定藏有許多奧秘值得我們探討。所以我決定以牠為對象進行觀察與研究。




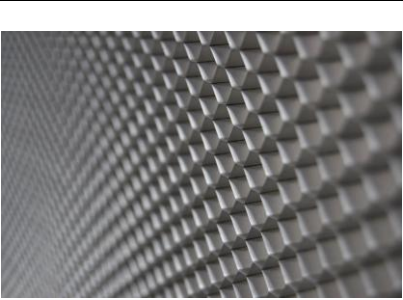

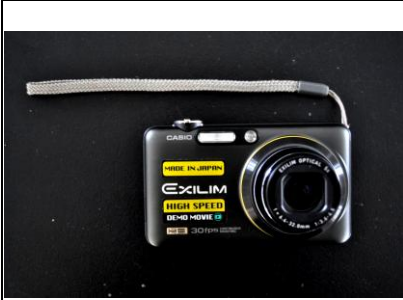
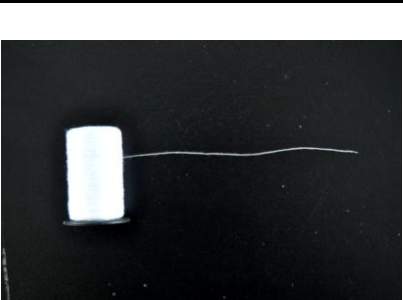
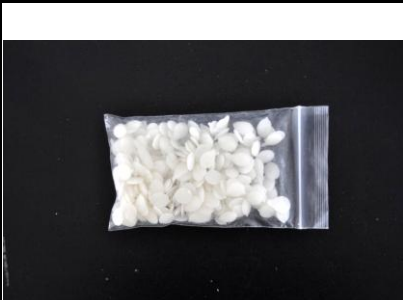
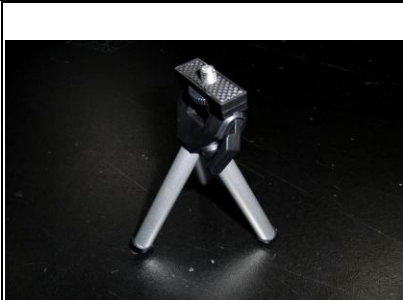
研究期間更發現了大白斑蝶與同屬不同種的 *Idea stolli*，在翅膀之形狀上有不小的差異性，基於對飛行的敏感度，認為這對兩種蝴蝶的飛行必定有所影響。我想要以物理學中流體力學的角度去分析這兩種型態構造對滑翔的影響，並進一步討論這些型態上的變異對於演化上的意義。

貳、研究目的

- 一、分析 *Idea leuconoe* 的滑翔姿勢
- 二、製作出 *Idea leuconoe* 仿生模型
- 三、藉由製作 *Idea leuconoe* 模型的經驗和參考 *Idea stolli* 的圖鑑與圖片，推測出 *Idea stolli* 身一、體型態，並製作其仿生模型
- 四、探討 *Idea leuconoe* 和 *Idea stolli* 翅膀的型態構造差異與滑翔能力的關係

參、研究設備及器材

表一、設備及器材一覽表：

※風洞			
照片			
名稱	工業用電風扇	調光器 800W/110V	風速計 model AR816
用途	提供動力，製造氣流於風洞	調整電阻，控制風扇轉速以製造各種風速	測量得知風洞內之風速
照片			
名稱	整流板(漸達蜂巢板芯)	電子秤 JADEVER SKY300 電子秤 BAO THI 2102-2002	數位相機 EX-FC100
用途	使進入風洞之氣流可平均穩定，達到整流目的	測量蝴蝶模型之升力、阻力。	30fps 高速拍攝蝴蝶飛行情況
※其他			
名稱			
照片	縫衣線	蜜蠟	迷你腳架
用途	於風洞中控制蝴蝶飛行範圍	黏著線與蝴蝶	架設相機

※蝴蝶 (*Idea leuconoe*)

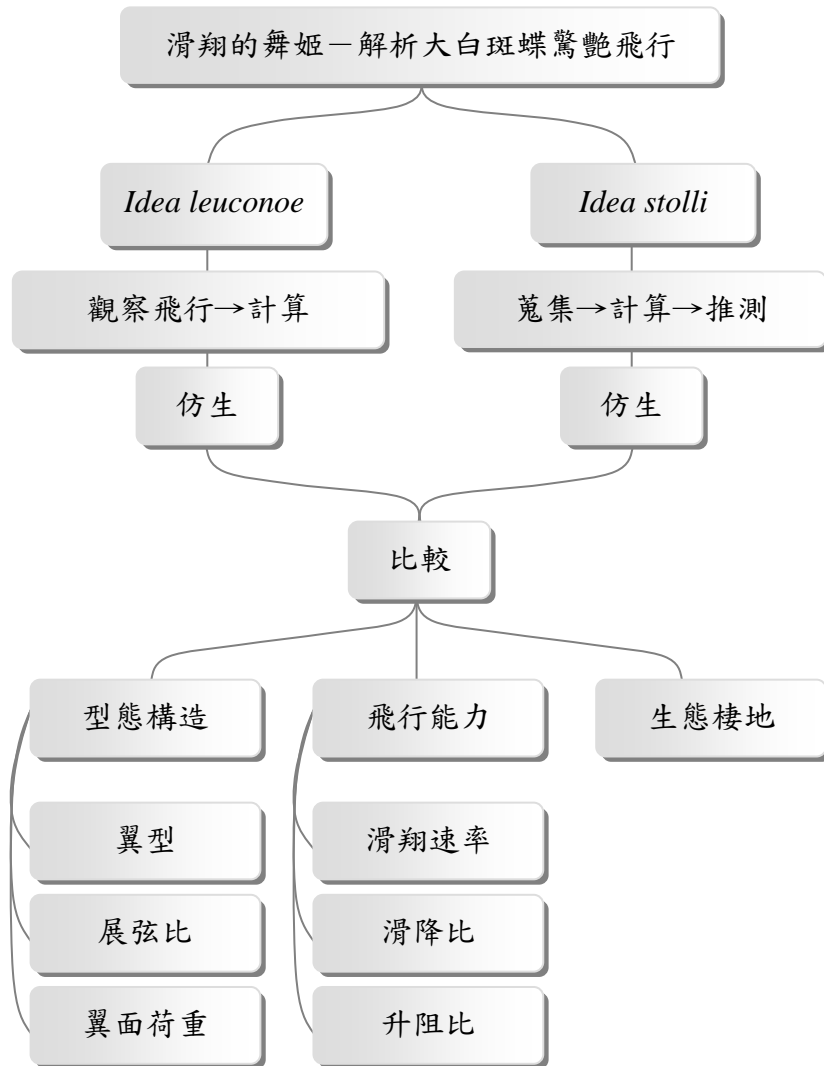
取得、照顧方式：

大白斑蝶的活體及標本，都取得自新北市五股區的準園生態園區蝴蝶溫室。另一部分活體是取得自埔里蝴蝶供應商，也寄養於準園。實驗前先自準園溫室取得蝴蝶，飼養在學校實驗室昆蟲飼養網架，以進行實驗。

照片			
名稱	蝴蝶活體	蝴蝶屍體(未脫水)	大白斑蝶標本
用途	觀察滑翔時的滑降比、速度、翼型、角度	測量重心、重量	測量面積、翼型
※模型		※養殖	
照片			
名稱	保麗龍仿生模型	準園人工蝴蝶園網室	昆蟲飼養網架
用途	實際飛行/風洞實驗	養殖蝴蝶	提供蝴蝶暫時居所

肆、研究過程或方法

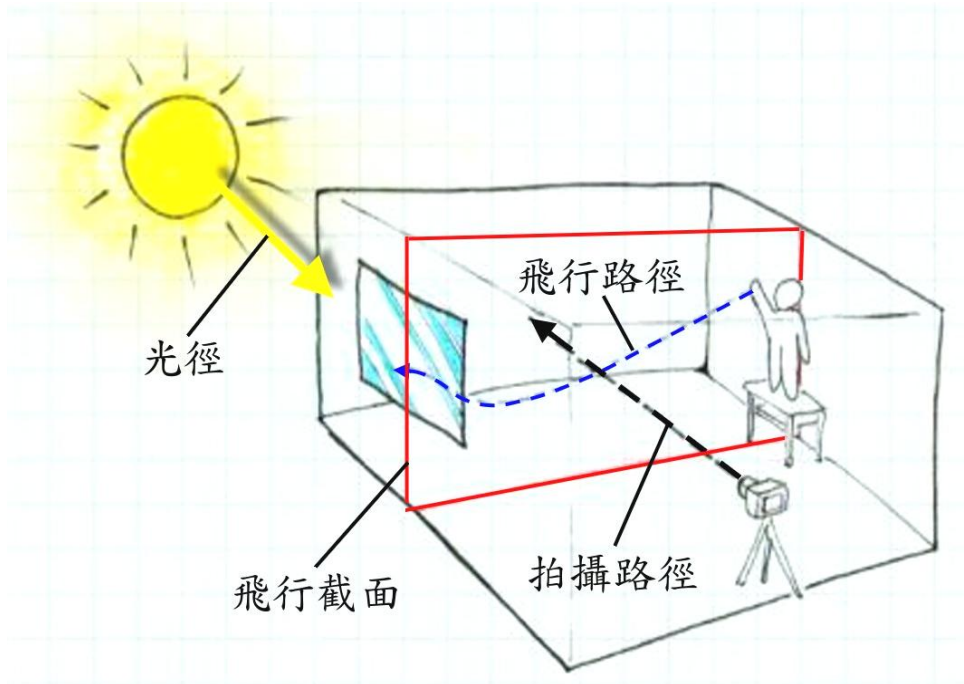
研究架構圖



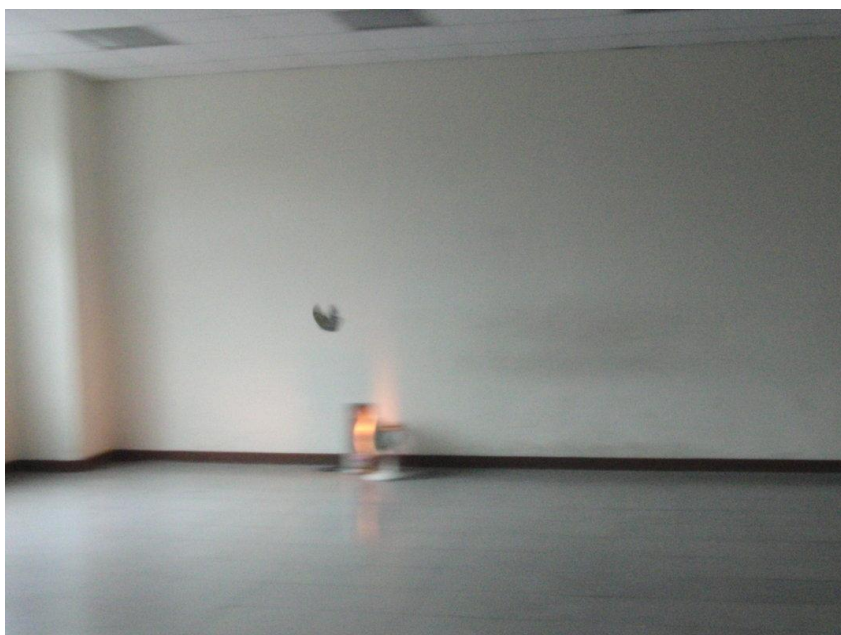
實驗一、於室內觀測 *Idea leuconoe* 實際滑翔情況

本實驗目的為了解 *I. leuconoe* 滑翔運動時的滑翔速率、滑降比，所以在教室內觀察大白斑蝶滑翔行為（圖二），以數位相機記錄，再由電腦合成相片並做資料分析。詳細過程如下：

1. 於空無一物的教室內，讓陽光由單一窗戶照入（圖一）
2. 將蝴蝶放於與窗戶垂直之中心線上（圖一之紅線）利用趨光性，放開讓其自行飛行
3. 蝴蝶飛行時，使用 EX-FC100 數位相機進行快拍（15 張/秒）
4. 使用軟體 PhotoImpact 將照片合成為連續飛行之單一相片進行分析



圖一、室內拍攝示意圖



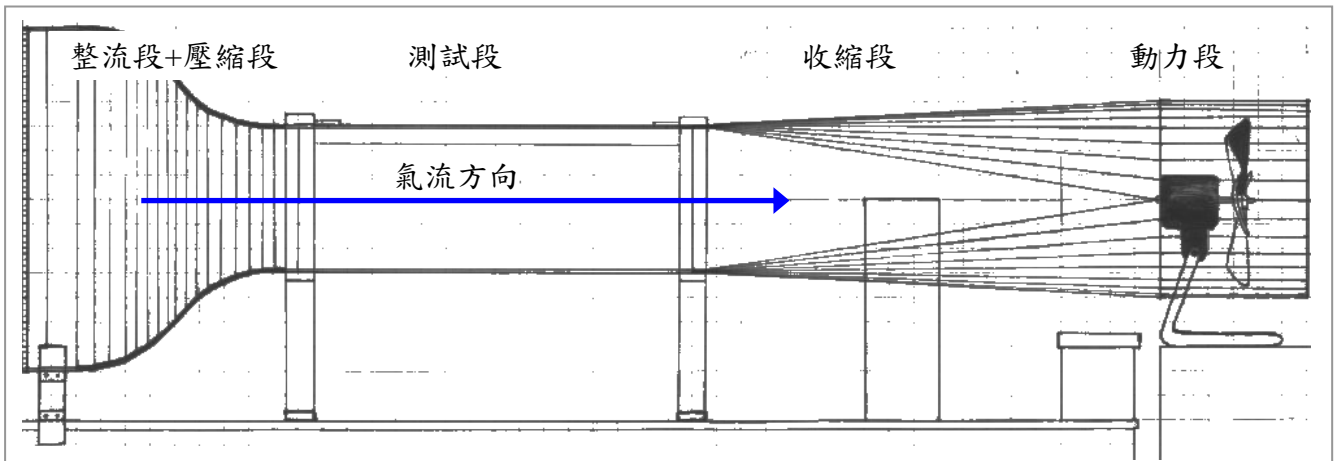
圖二、大白斑蝶於室內飛行

實驗二、自製簡易風洞

為了達到更精確的觀測，以及更進一步實驗，必須以風洞設備來完成。基於缺乏此實驗器材，所以藉由查詢相關小型亞音速風洞資料，並依照實驗室空間自行設計並製造而成，以便於日後實驗之進行。設計圖（圖三）及功能概述如下：

（一）風洞主體（圖四）：

- 1.目的：利用風洞控制飛行環境，便於分析蝴蝶於滑翔時的姿勢，並量測升力和阻力。
- 2.材料：主體使用塑膠瓦楞版為主要材料，木質角材為支架，並於測試段以透明壓克力板製作以便觀察。
- 3.運作流程：動力段反向裝設工業用電扇（圖五），以抽風的方式製造氣流於風洞內。空氣從入風口吸入，經鋁製蜂巢板（圖六）整流後又由收縮段（圖七）壓縮成穩定且快速的氣流，進入測試段並流過測試物，以達成實驗目的。之後經過由四邊形收成圓形的收縮段（圖八），經由風扇排出風洞外。



圖三、設計圖



圖四、風洞



圖五、工業電風扇

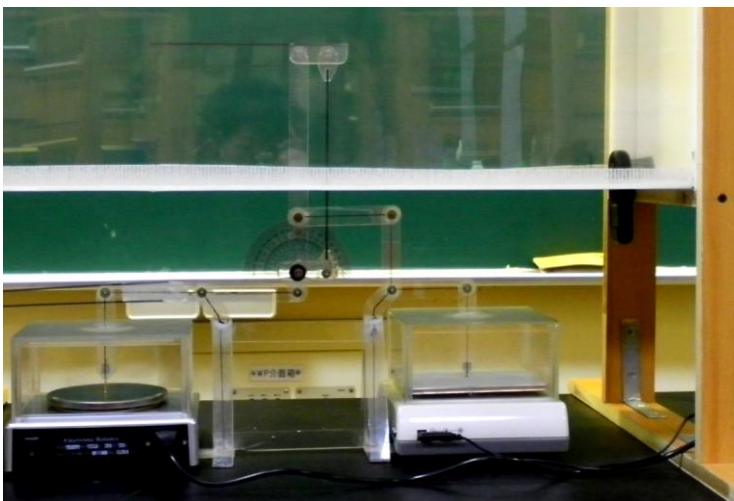
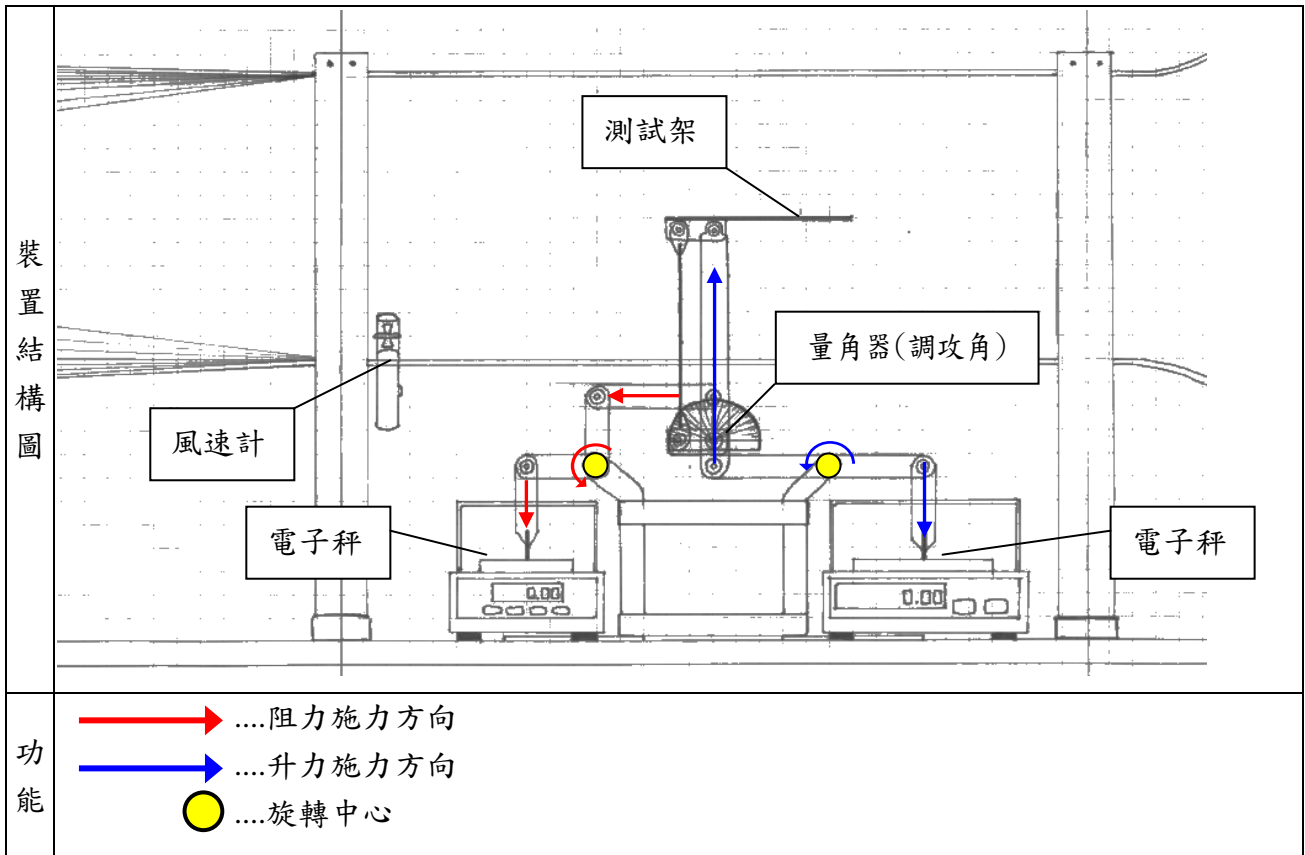
圖六、蜂巢板芯

圖七、收縮段

圖八、收縮段

(二)、升力、阻力測定裝置 (圖九)

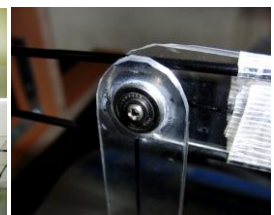
- 1.目的：測量升力與阻力，計算出飛行數據，就可加以分析其數值變化，了解飛行效率。
- 2.材料：傳動軸使用壓克力板，測試架為碳纖維棒，加上量角器可調整攻角 (圖十)；傳動軸連接處加上培林滾珠減少摩擦力 (圖十一)，末端撞針則用細螺絲當材料 (圖十二)。
- 3.施力方式：待測物固定於測試架，當與流動之空氣摩擦產生向上或向後的力時，就會分別經由兩組傳動軸變換施力方向，最終轉為向下的力，由撞針集中於一尖端，施於兩電子秤上，此時就可分別顯示升力與阻力 (圖十三) (待測物如果反方向施力，數值也將轉為負數)。



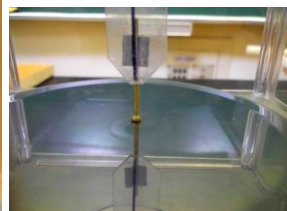
圖九、升力、阻力測定裝置



圖十、調攻角量角器



圖十一、連接處承軸



圖十二、撞針

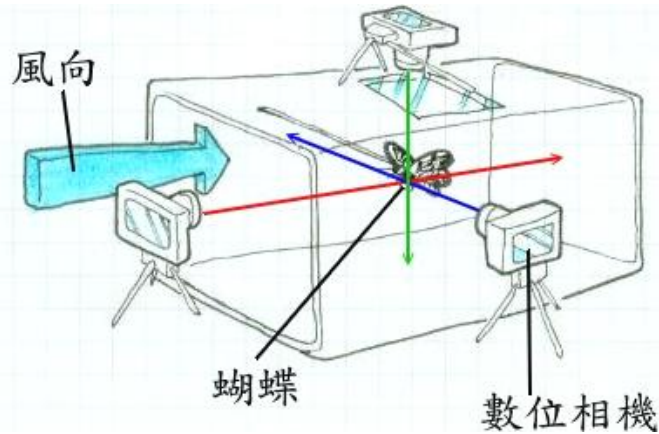


圖十三、實際測量情況

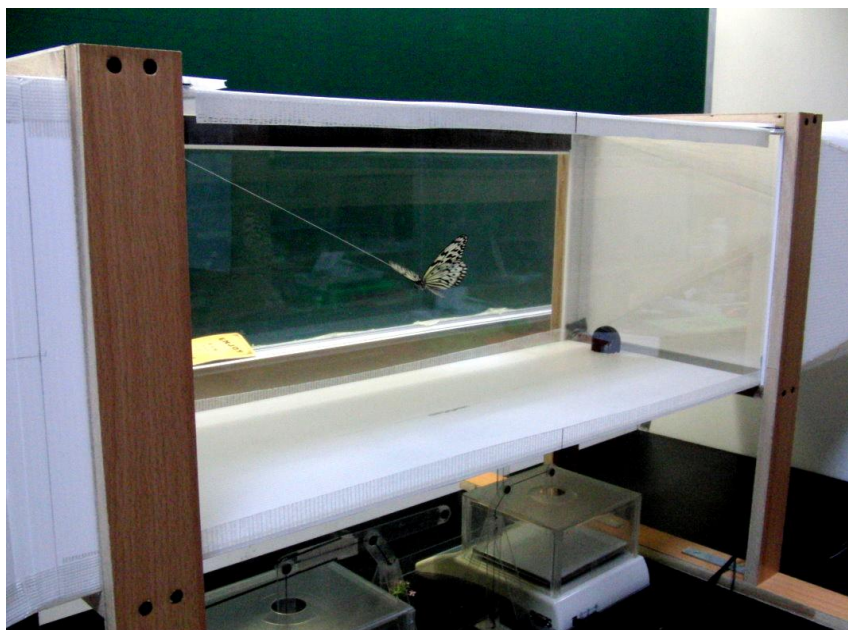
實驗三、於風洞內觀測 *Idea leuconoe* 滑翔姿勢

本實驗為了精確觀測蝴蝶滑翔實的姿勢，利用實驗一之蝴蝶滑翔速率，透過風洞控制相同風速，將大白斑蝶以線控制於一定的範圍與空間。以模擬蝴蝶外在飛行環境，讓蝴蝶於風洞內飛行（圖十五）。如此便可準確觀察蝴蝶滑翔時之姿勢，使用數位相機記錄後（圖十四），取得飛行數據並製作三視圖。詳細過程如下：

1. 加熱蜜蠟使其成半融化狀
2. 將縫衣線以蜜蠟黏著於大白斑蝶背版
3. 把大白斑蝶放置於風動測試段內（著地）
4. 啟動風洞，將風速調為實驗一的蝴蝶滑翔速率之測量結果（m/s）。
5. 當蝴蝶飛行後，開始用 EX-FC100 數位相機快速拍攝（30 張/秒）
6. 結束實驗後剪斷棉線把蝴蝶放回溫室
7. 用電腦截取出滑翔時的圖片，並製成 3 視圖
8. 進行測量計算與分析



圖十四、風洞拍攝示意圖



圖十五、大白斑蝶於風洞內飛行

實驗四、蒐集 *Idea leuconoe* 翅膀平均重量、身體重量、滑翔重心

藉由測量 *Idea leuconoe* 的重心與計算翅膀之平均重量，就可用此資料進一步達成仿生實驗所需資料，製作出更精確的模型。詳細過程如下：

(一) 翅膀平均重量：

1. 將數片 *Idea leuconoe* 標本之翅膀使用電子秤測量總重量 (圖十六、圖十九)
2. 利用掃描器掃描翅膀成電子檔並利用 ImageJ 計算總面積 (圖十七)
3. 將總重量除以總面積將得到大白斑蝶翅膀之單位面積具有的重量 (gw)

(二) 身體重量：

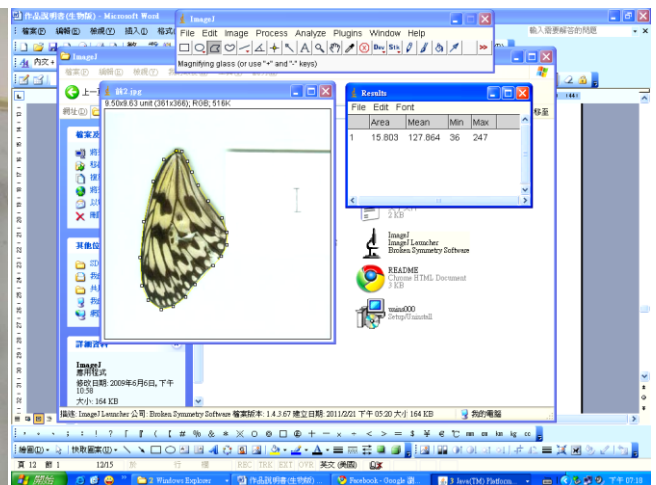
1. 蝴蝶總重量扣除翅膀重量得到身體重量
2. 將身體重量除以身體長度得到大白斑蝶身體之單位長度具有的重量 (gw)

(三) 滑翔重心：

1. 利用剛死亡但未脫水之 *Idea leuconoe*，擺出實驗二之滑翔姿勢
2. 置於自製重心測試架上，微調至平衡 (圖十八)
3. 用數位相機拍攝記錄
4. 利用電腦進行測量與分析



圖十六、測量大白斑蝶翅膀總重量



圖十七、測量大白斑蝶總翼面面積



圖十八、測量 *Idea leuconoe* 重心

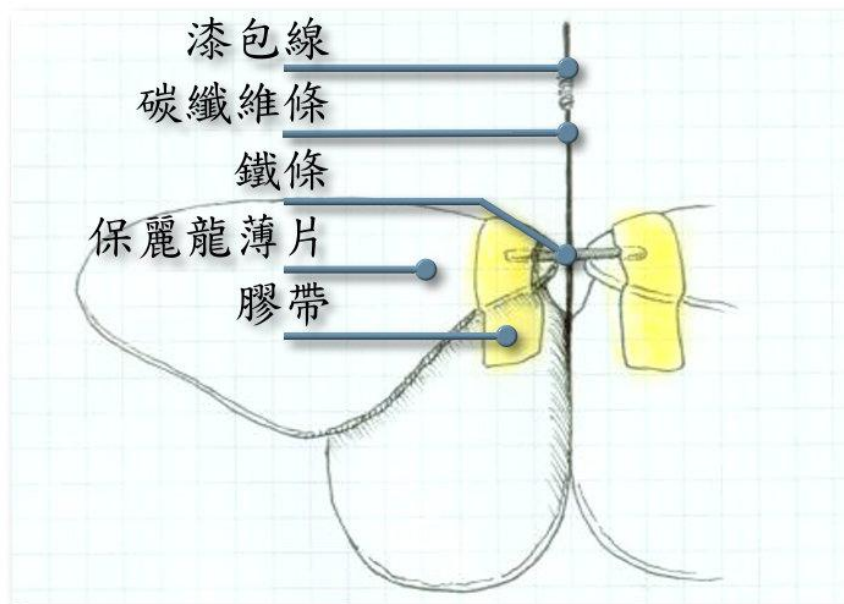


圖十九、*Idea leuconoe* 翅膀標本

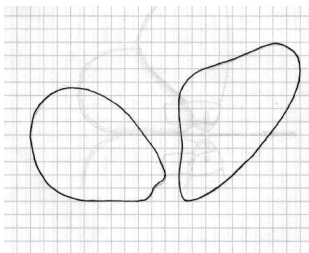
實驗五、製作 *Idea leuconoe* 模型，並檢測與活體之相似度

經由先前實驗，我們得知大白斑蝶滑翔時的各種資料。現在利用這些資料，製作出模型，並以蝴蝶模型代替活體，進行實驗一步驟，以檢視其仿生程度與正確性。過程如下：

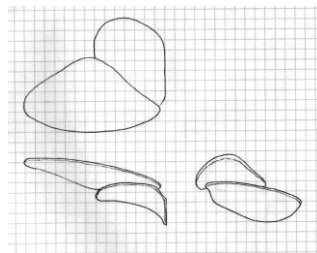
1. 利用實驗一、實驗二結果，繪製設計圖（圖二十）、製作保麗龍模型（表二）
2. 投擲保麗龍模型，用數位相機以快拍（15張/秒）記錄其飛行路徑
3. 使用軟體將照片合成為連續飛行之單一相片
4. 利用相片進行分析
5. 與大白斑蝶活體飛行數據比較是否相符合，了解觀察結果及製作模型是否正確



圖二十、模型設計圖



圖二十一、依據蝴蝶實際尺寸繪製之平面圖



圖二十二、依據實驗結果繪製之三視圖




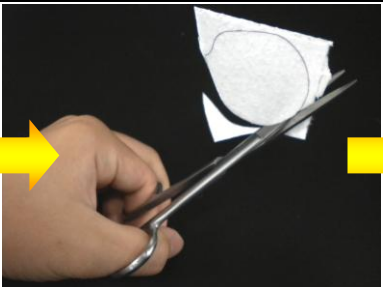


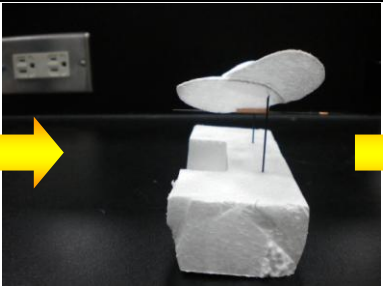

圖二十三、完成品



圖二十四、完成品

實驗五之製作：

表二、仿生模型製作過程

	過程	過程	過程
照片			
說明	切割保麗龍薄片	畫線、材切	黏著接合
照片			
說明	秤重、組合	調整重心位置	測試

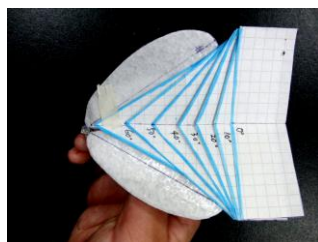
實驗六、以風洞測定不同前翅角度之 *Idea leuconoe* 模型對升力、阻力之影響

利用實驗四的模型，經修改成可調翅膀角度後，進行風洞實驗。藉由改變前翅翅膀之角度，進而改變翼型。分別測出其升力、阻力後，就可得知 *Idea leuconoe* 的飛行升阻比，並且了解牠是否以最恰當之姿勢來完成滑翔飛行。詳細過程如下：

1. 製作可調式前翅之 *Idea leuconoe* 模型 (圖二十五)
2. 前翅分別以 -30° 、 -20° 、 -10° 、 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 進行風洞實驗 (圖二十八) (0° 為兩前翅之中心線呈一直線)
3. 紀錄數據，並以電腦分析



圖二十五、
可調式前翅模型



圖二十六、
調整角度之各量角片



圖二十七、
風洞模型架

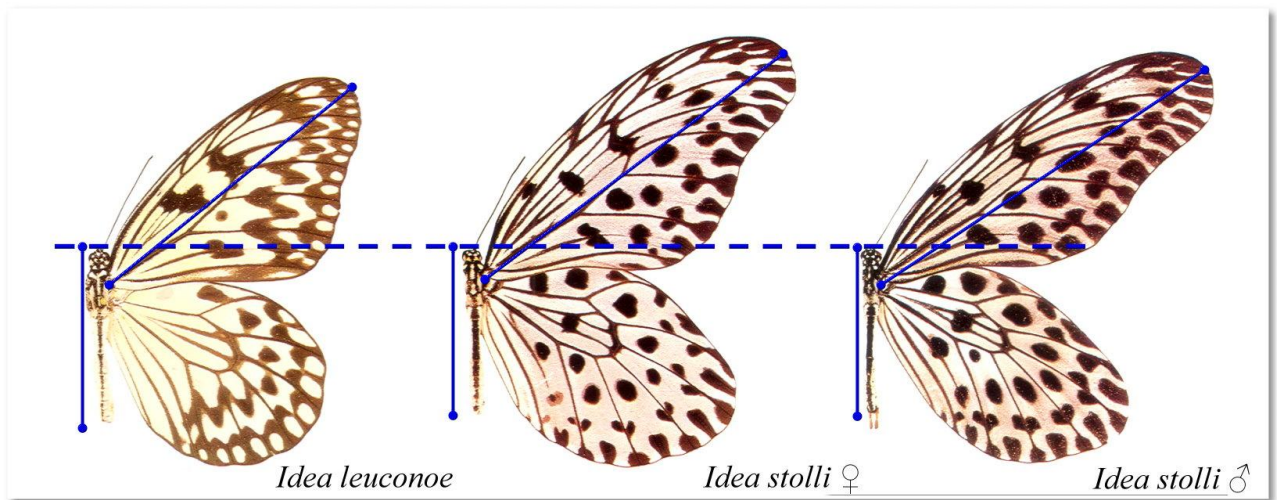


圖二十八、
於風洞內測試之情形

實驗七、由 *Idea leuconoe* 推算 *Idea stollia* 之體重並製作 *Idea stollia* 模型

為了比較同屬不同種的蝴蝶在飛行能力上有何差異，選擇了與 *Idea leuconoe* 翼型差距較大的 *Idea stollia* 來進行實驗。但因活體無法取得，使用了先前模仿 *Idea leuconoe* 活體與標本以製出模型的方法，並以 *Idea stollia* 標本照片和實際飛行照片，再製作出 *Idea stollia* 的仿生模型（圖二十九）。詳細過程如下：

1. 計算 *Idea leuconoe* 翼面積總重量，扣除後再加上計算出的 *Idea stollia* 翼面積總重量
2. 製作 *Idea stollia* 保麗龍模型雄性雌性各一隻（圖三十、圖三十一）
3. 製作可調式前翅之 *Idea stollia* 模型雄性雌性各一隻（圖三十二、圖三十三）

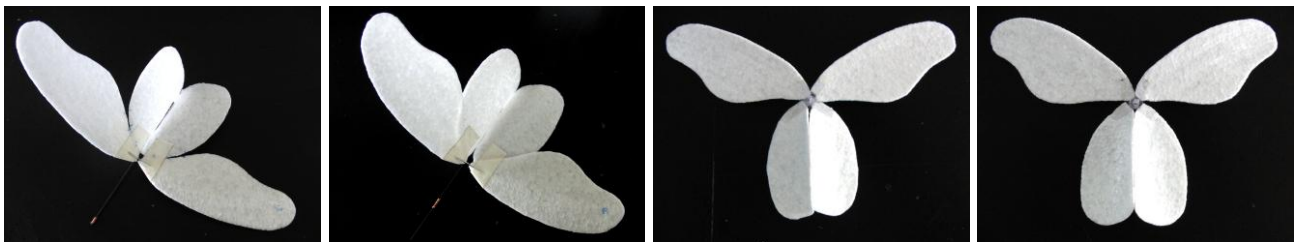


圖二十九、蝴蝶身長與翅膀面積之計算

實驗八、利用 *Idea stollia* (♂ & ♀) 模型進行實驗四、實驗五

製作了 *Idea stollia* 雄性、雌性兩種模型，並進行投擲與風洞實驗後，得到的數據就可將 *Idea stollia* 與 *Idea leuconoe* 相互比較，也可得知 *Idea stollia* 雄性雌性在滑翔能力上的差異。詳細過程如下：

1. 投擲保麗龍模型，用數位相機以快拍（15張/秒）記錄其飛行路徑
2. 前翅分別以 -30° 、 -20° 、 -10° 、 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 進行風洞實驗
3. 分析相片與數據，將雄性雌性相比並與 *Idea leuconoe* 比較



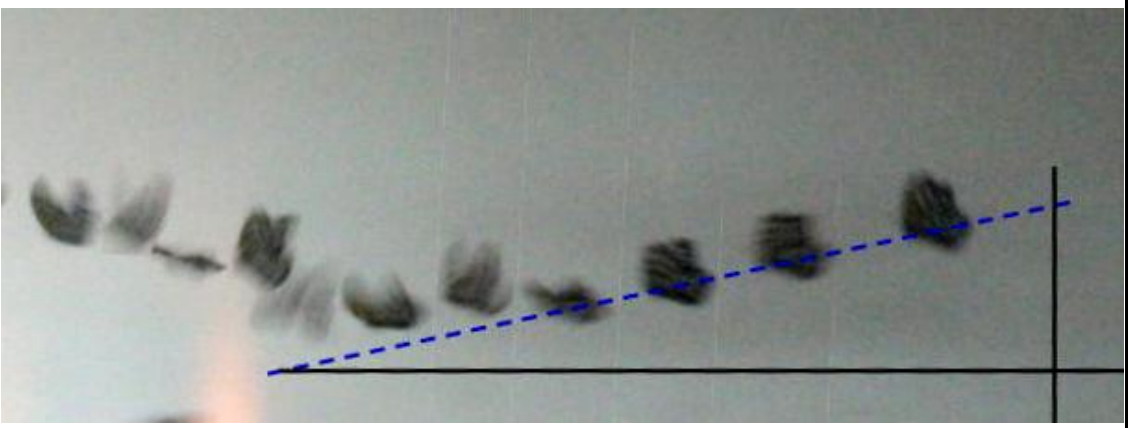
圖三十、*Idea stollia* ♂ 仿生模型 圖三十一、*Idea stollia* ♀ 仿生模型 圖三十二、*Idea stollia* ♂ 可調式前翅模型 圖三十三、*Idea stollia* ♀ 可調式前翅模型

伍、研究結果

一、*Idea leuconoe* 實際滑翔觀測

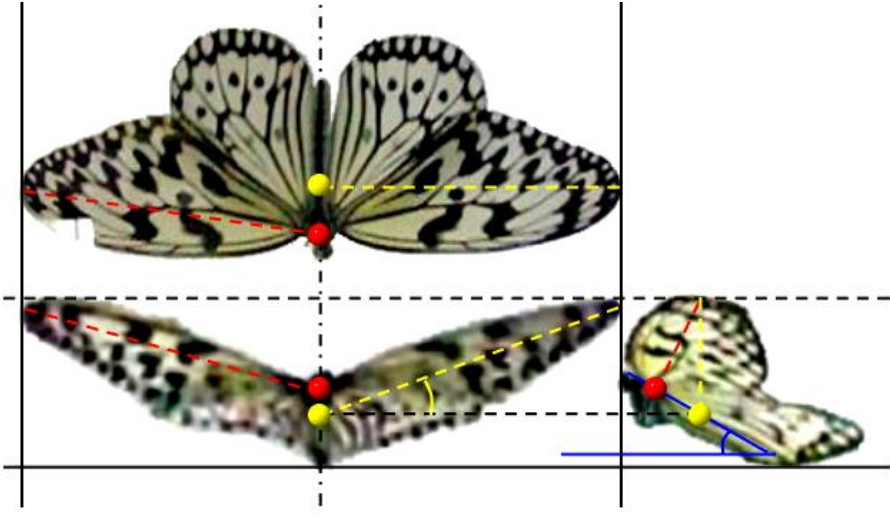
原本使用 1/30 秒快拍，但蝴蝶前進距離不大，合成照片時會有重疊問題不易辨認，改為奇數張合成（即 1/15 秒），拍攝照片如下：

表三、*Idea leuconoe* 滑翔速率與滑降比

照片	
滑翔速率 (cm/s)	157.238
滑降比 (滑/降)	4.079

二、*Idea leuconoe* 於風洞滑翔觀測

表四、大白斑蝶風洞滑翔三視圖

三視圖	
體重 (g)	3.5
翼展 (cm)	6.9
上反角 (x°)	20
翼面積 (cm^2)	59.812

三、測量 *Idea leuconoe* 翅膀重量

表五、*Idea leuconoe* 翅膀平均重量

	總重量 (gw)	總面積 (cm ²)	單位面積具有的重量
數值	0.207	235.69	0.0008782

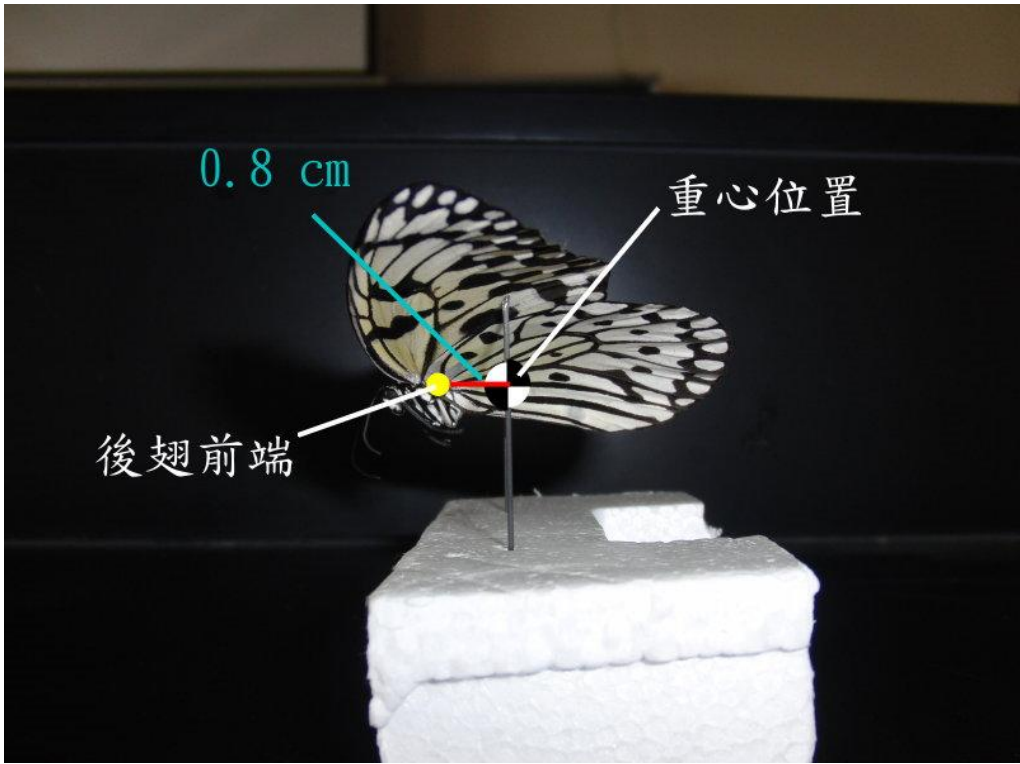
四、測量 *Idea leuconoe* 身體重量

表六、*Idea leuconoe* 身體平均重量

	總重量 (gw)	翅膀面積 (cm ²)	總翅膀重量 (gw)	身體長度 (cm)	身體總重量 (gw)	單位長度具有的重量
數值	0.35	59.812	0.053	3.75	0.297	0.0792

五、測量 *Idea leuconoe* 重心位置

表七、*Idea leuconoe* 重心位置

照片		
重心位置 (cm)	0.8 (後翅前端往後 0.8 cm)	

六、推算 *Idea stoll*i 翅膀及身體重量

表八、*Idea stoll*i 重量推算

	總重量 (g)	翅膀面積 (cm ²)	翅膀重量 (g)	身體長度 (cm)	身體重量 (g)	計算結果 (g)
<i>Idea leuconoe</i>	0.350	59.812	0.053	3.75	0.297	0.350
<i>Idea stoll</i> i ♂		71.580	0.063	3.95	0.313	0.376
<i>Idea stoll</i> i ♀		76.302	0.067	3.50	0.277	0.344

七、計算 *Idea leuconoe* 與 *Idea stolli* 展弦比

表九、*Idea leuconoe* 與 *Idea stolli* (♂ & ♀) 之展弦比

	翅膀長度 (翼展) (cm)	翅膀面積 (cm ²)	展弦比
<i>Idea leuconoe</i>	13.640	59.812	3.111
<i>Idea stolli</i> ♂	16.860	71.580	3.971
<i>Idea stolli</i> ♀	16.380	76.302	3.516

八、*Idea leuconoe* 活體與模型飛行數據之比較

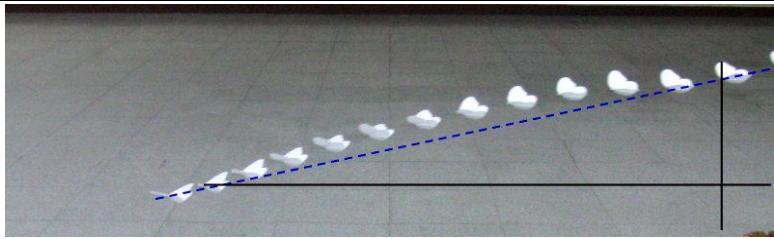
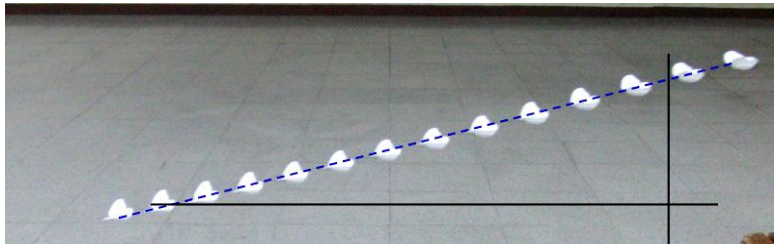
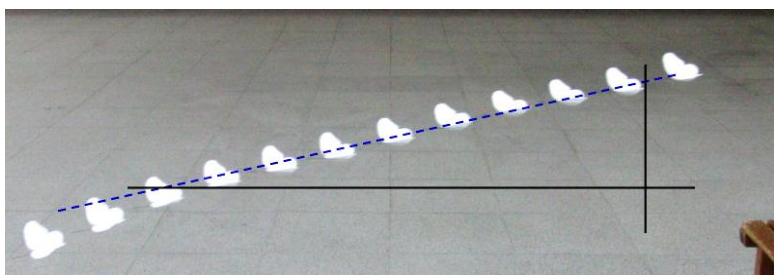
表十、活體與模型之誤差率

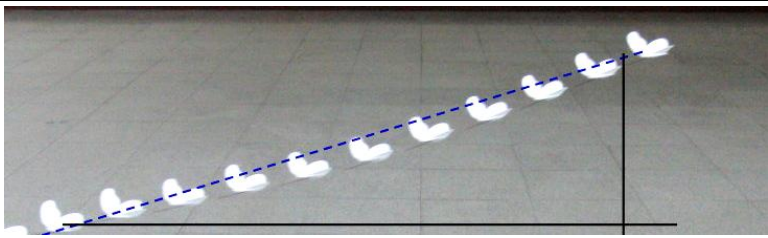
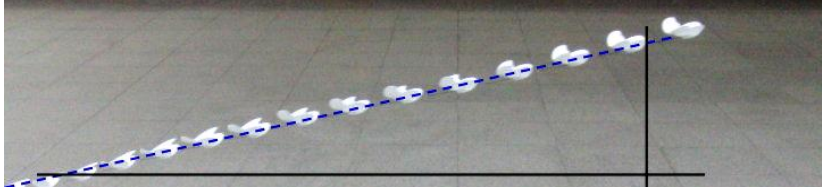
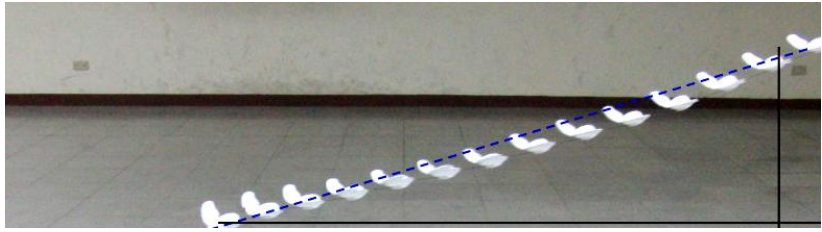
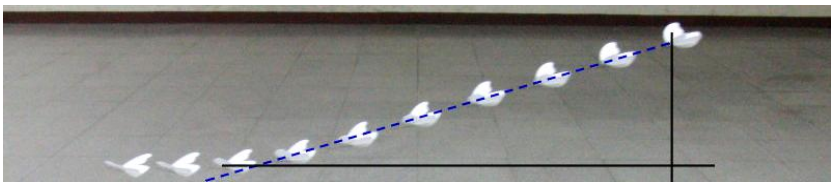
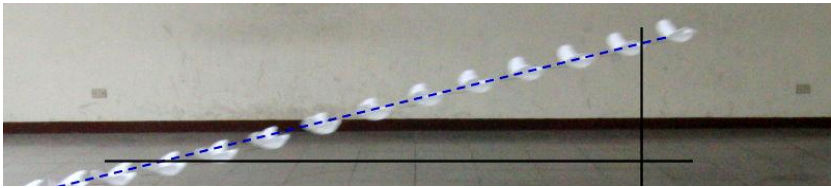
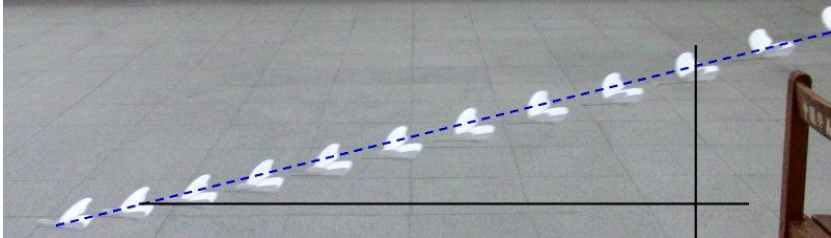
	活體	模型	誤差率
滑翔速度 (cm/s)	157.24	160.98	2.37%
滑降比 (滑/降)	4.08	3.89	-4.65%

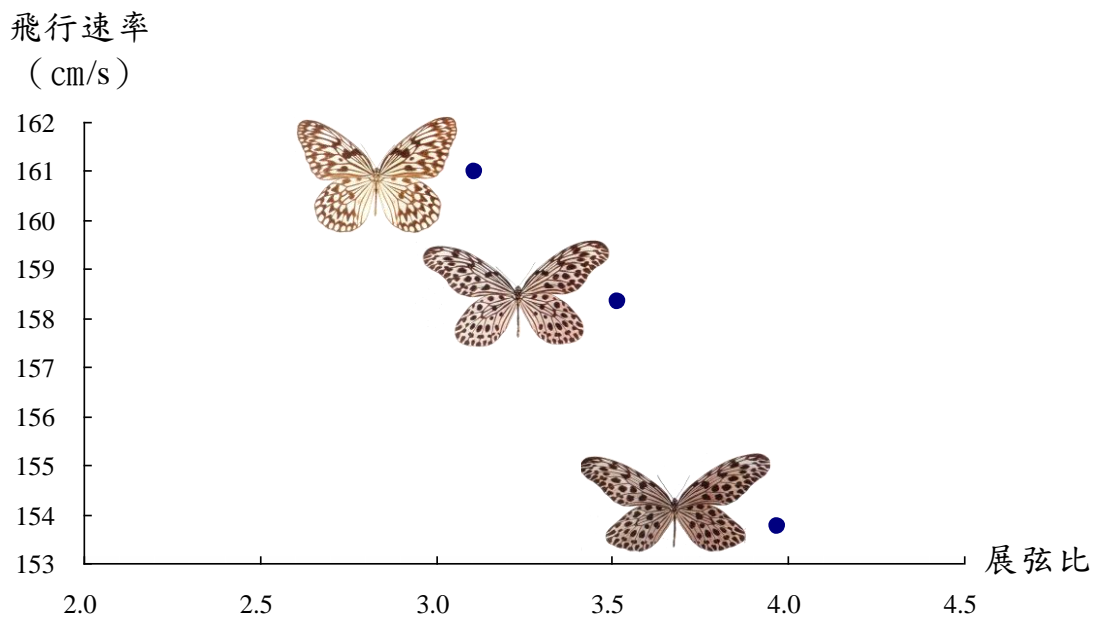
※由此比較數據，誤差率落在±5%以內，所以可知模型與活體的滑翔十分類似

九、*Idea leuconoe*、*Idea stolli* 模型滑翔觀測

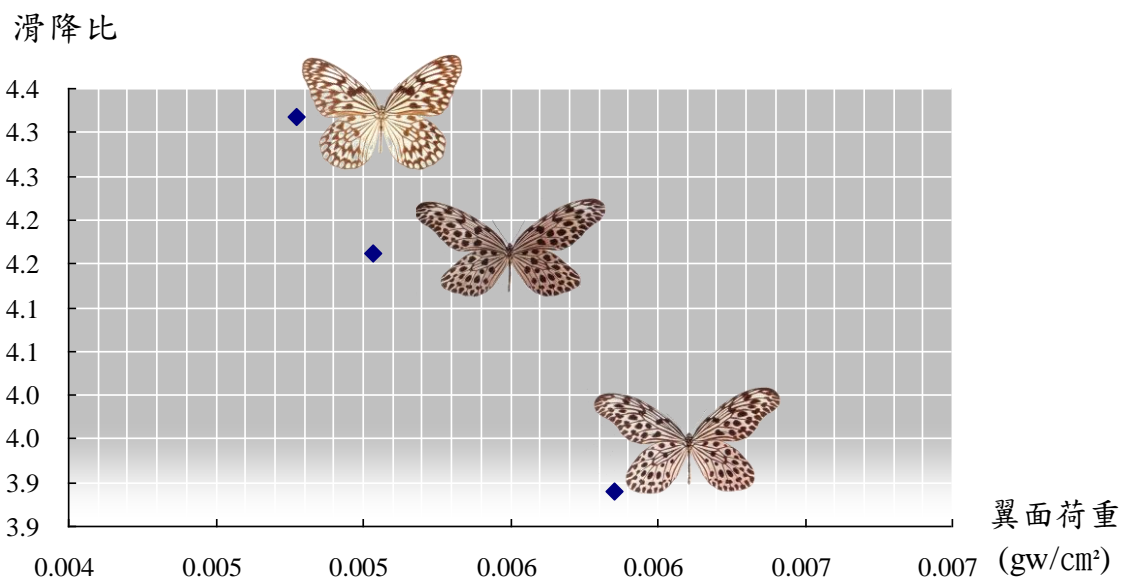
表十一、*Idea leuconoe*、*Idea stolli* (♂ & ♀) 模型滑翔速率與滑降比

<i>Idea leuconoe</i>			
次數	照片	滑翔速度 (cm/s)	滑降比 (滑/降)
第一次投擲		145.39	4.16
第二次投擲		165.08	3.89
第三次投擲		172.49	3.62
平均值		160.98	3.89

<i>Idea stolti</i> ♂			
次數	照片	滑翔速度 (cm/s)	滑降比 (滑/降)
第一次		183.95	4.12
第二次		131.10	4.46
第三次		142.66	3.91
平均值		153.57	4.16
<i>Idea stolti</i> ♀			
次數	照片	滑翔速度 (cm/s)	滑降比 (滑/降)
第一次		175.67	4.38
第二次		130.79	4.20
第三次		168.56	4.37
平均值		158.34	4.32



圖三十四、*Idea leuconoe*、*Idea stollia* (♂ & ♀) 展弦比與飛行速率之關係
 分析：展弦比愈大，飛行速率愈慢；展弦比愈小，飛行速率愈大。



圖三十五、*Idea leuconoe*、*Idea stollia* (♂ & ♀) 翼面荷重與滑降比之關係
 分析：翼面荷重愈重，滑降比愈小；翼面荷重愈輕，滑降比愈大。

十、改變模型前翅角度並測量其升阻比

表十二、*Idea leuconoe* 前翅角度與升阻比之關係

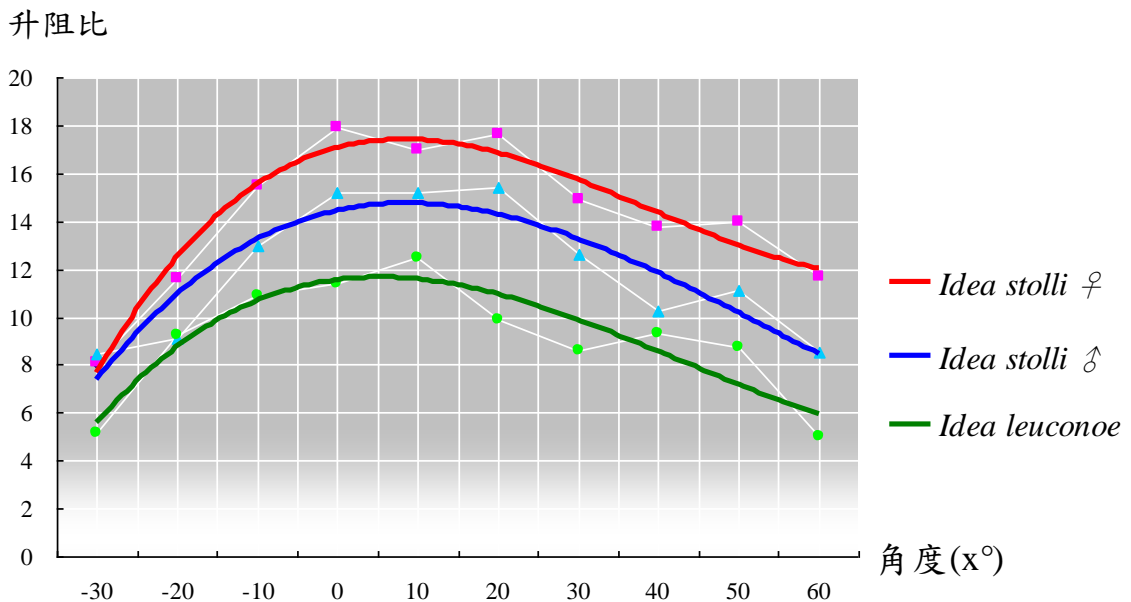
前翅角度 (x°)	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
升力 (gw)	0.57	0.83	0.98	1.14	1.12	0.79	0.69	0.84	0.61	0.45
阻力 (gw)	0.11	0.09	0.09	0.1	0.09	0.08	0.08	0.09	0.07	0.09
升阻比	5.182	9.222	10.889	11.400	12.444	9.875	8.625	9.333	8.714	5.000

表十三、*Idea stollii* ♂ 前翅角度與升阻比之關係

前翅角度 (x°)	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
升力 (gw)	1.27	1.18	1.56	1.67	1.52	1.39	1.26	0.92	0.89	0.51
阻力 (gw)	0.15	0.13	0.12	0.11	0.1	0.09	0.1	0.09	0.08	0.06
升阻比	8.467	9.077	13.000	15.182	15.200	15.444	12.600	10.222	11.125	8.500

表十四、*Idea stollii* ♀ 前翅角度與升阻比之關係

前翅角度 (x°)	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
升力 (gw)	1.13	1.28	1.55	1.79	1.53	1.41	1.34	1.24	1.12	0.82
阻力 (gw)	0.14	0.11	0.1	0.1	0.09	0.08	0.09	0.09	0.08	0.07
升阻比	8.071	11.636	15.500	17.900	17.000	17.625	14.889	13.778	14.000	11.714



圖三十六、*Idea leuconoe*、*Idea stollii* (♂ & ♀) 前翅角度與升阻比之關係

分析：1. *Idea stollii* 之滑翔能力較 *Idea leuconoe* 佳

2. *Idea stollii* 之滑翔能力為雌性較雄性佳

3. *Idea stollii* 和 *Idea leuconoe* 之前翼角度為 0°~10° 時升阻比達到最大值

陸、討論

一、實驗器材之討論

(一) 關於風洞

1. 蜂巢板芯

在製作風洞前，大量蒐集有關小型風洞的資料，漸漸設計出風洞雛形。其中有許多資料，整流板都是用一面如蜂巢狀的中空鋁板來製作，英文翻譯後查出此材料為「蜂巢板」，因其結構輕且具剛性，用於航太、建材方面。而台灣剛好有一家位於台南的廠商「翰達企業有限公司」有在製造販售，詢問尺寸和價錢後，因為所需的量很少，又是用於研究中，該公司直接免費贈送並郵寄來北部，萬分感謝他們慷慨大方的支持。

2. 風洞測試段電子秤數據亂跳問題

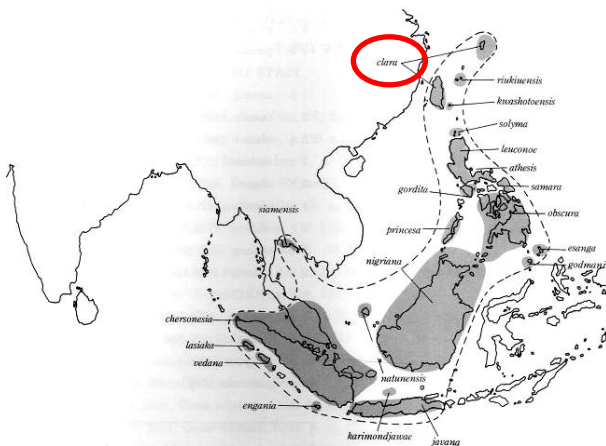
當風洞的升力阻力測量機構完成後，就開啟風扇開始測試。結果發現兩台電子秤所顯示的數據極為混亂，不停的跳上跳下。再測量裝置誤差極高的情況下，根本無法進行實驗。

過了好一段時間不斷尋找原因，才發現只是工業用電扇的振動頻率太大，造成桌面震動，傳到電子秤上，導致數據不準。之後把整座風洞向後移，並分離動力段，於電扇下方另擺櫃子支撐，震動情形大幅降低後，電子秤的數據跳動幅度才減少，也才穩定許多。

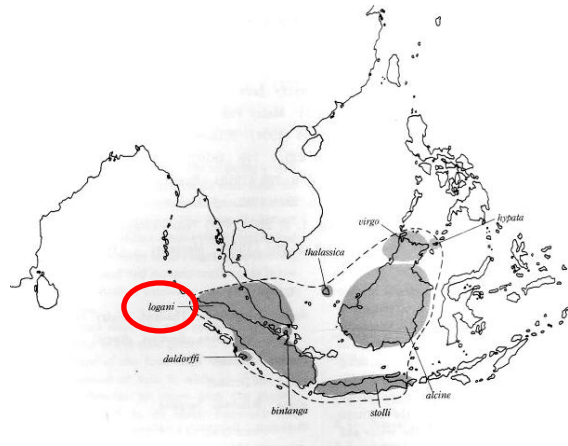
(二) 關於帛斑蝶屬 (*Idea*)

Idea leuconoe、*Idea stollii* 因亞種眾多，為求精準，本研究之研究對象為台灣本島的 *Idea leuconoe clara* (圖三十七)，與其相比較之對象，為分布於新加坡與馬來西亞的 *Idea stollii logani* (圖三十八)。

台灣的大白斑蝶 (*Idea leuconoe clara*) 分布東北角、恆春半島及綠島。體型碩大，而那曼妙的緩慢飛行與滑翔，深深吸引著每個人。其生性溫和且易徒手捕捉，因而被暱稱為「大笨蝶」。成蝶壽命長、養殖容易，很適合拿來做研究對象。



圖三十七、*Idea leuconoe* 分布圖



圖三十八、*Idea stollii* 分布圖

取自 Osamu Yata & Kazuhiko Morishita .1985/05.

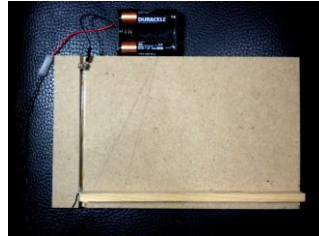
(三) 關於仿生模型

1. 保麗龍薄片裁切方式

利用市售的保麗龍切割器，自行改造（圖四十）以利切割出薄片狀，通電使其發熱。利用保麗龍遇熱熔化的特性，達到切割效果。固定切割器，讓鎳鉻絲與底板成一長細縫（圖四十一），通電後移動保麗龍通過其裝置，使鎳鉻絲在保麗龍底面進行切割，切出的保麗龍就可成固定厚度、薄且平的紙張一般（圖四十二）。



圖三十九、
市售保麗龍切割器



圖四十、
自行改造之切割器



圖四十一、
鎳鉻絲與底板之細縫



圖四十二、
保麗龍薄片

2. 模型重量之控制

蝴蝶仿生模型有一個原則，那就是重量要和活體一樣。重量對於飛行影響非常大，固定模型重量就顯的非常重要。取得 *I. leuconoe* 活體，就可得知成蝶重量；而 *I. stollii* 生長在東南亞，台灣沒有，因此無法取得實體，就依照比例由 *I. leuconoe* 推算其重量。在仿生模型兩片前翼間，黏有一條由迴紋針製成的鐵絲，主要功能除了支撐兩片主翼，維持整架模型之結構；同時也是在進行重量的微調。在製作模型時，先黏接好各部份材料，再將半成品、一條鐵絲與兩條膠帶置於電子秤上，以鐵絲長短進行重量之調整，完成後才將鐵絲黏於模型上。

3. 模型之模擬與設計

在製作蝴蝶仿生模型時，都盡量能與活體達到最高相似度，但還是有些方面，技術層面無法達到，設計上會有其應對方法。蝴蝶翅膀後緣的微小鋸齒狀，都平均圓滑處理；且有細微之波浪狀起伏，也忽略以平面代替；關於蝴蝶身體，因主要探討其飛行，但身體受力極少，而且蝴蝶滑翔時都會固定腹部並以後翅包覆，影響不大，所以沒有製作身體。完成模型後並設計實驗比較其與活體的滑翔速度及滑降比（註1），誤差率均落於±5%以內，可知設計方向正確。

二、研究方法之討論

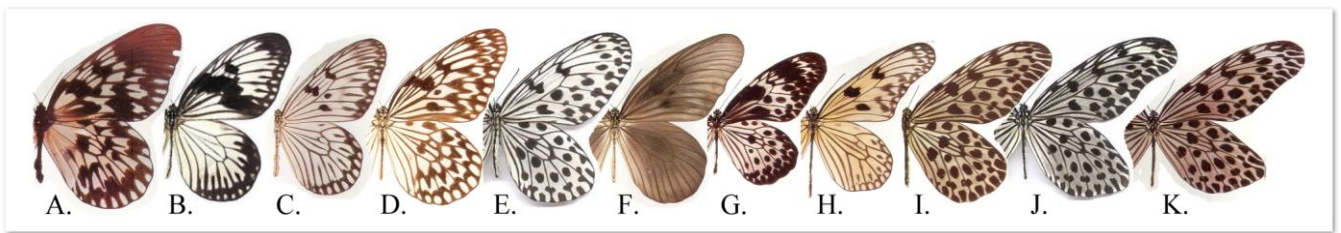
(一) 實際滑翔觀察方式之演變

實驗一開始，原本想在準園生態園的蝴蝶溫室中實地進行觀測紀錄，但當中有許多食草、蜜源植物，溫室就顯的擁擠許多，拍攝空間不足，也無法觀察到蝴蝶長距離飛行。接下來試著帶回學校，置於寬敞且空無一物的分組教室內觀察後，前述的問題都解決了，但飛行路徑是三維的，而相機只能紀錄二維，難以估計實際距離。而且在日光燈的教室中，蝴蝶會一直繞著燈打轉亂飛，關掉燈後，就會直線朝有光透進來的窗戶飛去，這讓我靈機一動，如果利用此趨光性之特性，就可以控制蝴蝶在與攝影機成 90°的平面飛行，如此就可以精確的算出飛行速率和滑降比。

(二) 為何使用 *Idea stollii* 來比較？

當初在進行 *Idea leuconoe* (圖四十四) 實驗同時，為了充分對此物種了解，在網路上大量搜尋相關資料。發覺其中一張圖片，翅膀花紋和 *I. leuconoe* 類似，而且都很會滑翔，但在前翅形狀方面卻成奇特怪異的細長型，這樣的變化對於滑翔有何影響，其中又有何意義呢？好奇心開始了我對 *Idea* 屬的其他蝴蝶的探討。

比較 *Idea* 屬的各種蝶類後 (圖四十三)，發現翅膀細長度最極端的是 *I. stollii*、*I. lynceus* 等蝴蝶。而其中網路文獻最為豐富的就屬 *I. stollii*，因而成為實驗中，與 *I. leuconoe* 比較的對象。而 *I. leuconoe*，雄蝶與雌蝶基本上外型相同；但 *I. stollii* 有二型，雄雌外型不同 (圖四十五、四十六)，雌蝶翅膀稍較雄蝶寬，也列為比較的要點之一。



圖四十三、*Idea* 屬蝴蝶翼型比較圖

A. *Idea tambusisiana* ; B. *Idea durvillei* ; C. *Idea idea* ; D. *Idea leuconoe* ;
E. *Idea hypermnestra* ; F. *Idea blanchardi* ; G. *Idea agamarschana* ;
H. *Idea electra* ; I. *Idea lynceus* ; J. *Idea iasonia* ; K. *Idea stollii*

取自 Osamu Yata & Kazuhiko Morishita .1985/05 .及網路資料自行截圖合成



圖四十四、*Idea leuconoe*



圖四十五、*Idea stollii* ♀



圖四十六、*Idea stollii* ♂

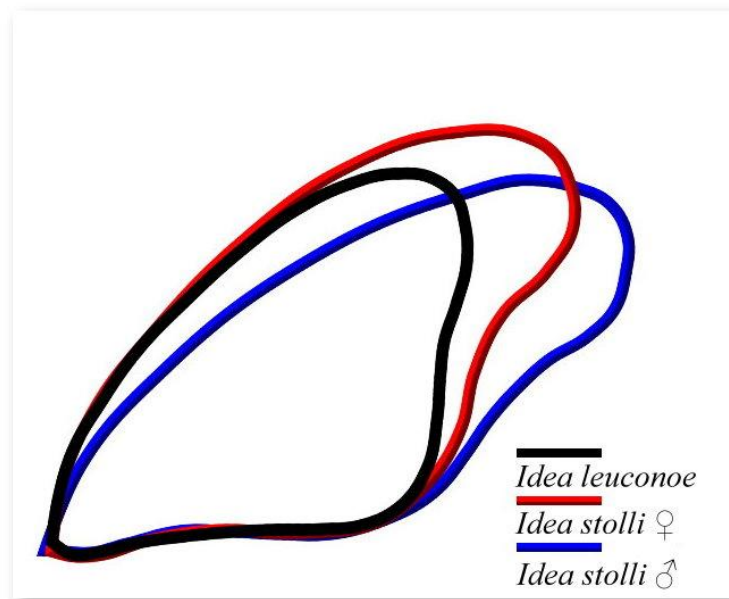
三、探討 *Idea stoll* 和 *Idea leuconoe* 型態構造與滑翔的關係

(一) 比較 *Idea stoll* 和 *Idea leuconoe* 之滑翔能力

為了比較這兩種蝴蝶的滑翔能力，必須實際測出升阻比（註2），但因無法取得 *Idea stoll* 實體，因此依 *Idea stoll* 和 *Idea leuconoe* 的基本資料，做成模型再比較。結果發現 *Idea stoll* 擁有較高的升阻比。

由功能型態的觀察分析，在兩種蝴蝶前翅形狀差異方面，發現前翅 *I. stoll* 的前翅相較於 *I. leuconoe*，又細又長（圖四十七）。翅膀變細，飛行時可減少翅膀翼端的誘導阻力（註3），提高飛行效率、增加滯空時間。但如果只變細，面積相對會變少，體重不變，翼面荷重（註4）就會增加，蝴蝶將過重無法飛行，所以 *I. stoll* 加長翅膀，且維持一定的翅膀面積。以矩形說明，一個正方形變成長方形而面積不變時，長與寬分別增長與縮短。以航空學說明，蝴蝶翅膀的長為翼展（註5）；寬為弦長（註6），展弦比（註7）就是翼展除以弦長的比值，所以展弦比愈高，翅膀愈為細長、誘導阻力愈小、愈能適合滑翔。

以航空學的角度來看，展弦比的高的航空器，飛行速率較低，滑降比較高，屬於滑翔機一類的飛機，其飛行較慢、較穩定；展弦比低的航空器則反之，屬於戰鬥機一類，飛行極為靈活的飛機。而 *I. leuconoe* 和 *I. stoll* 在翼型及飛行能力上的差異，就可比擬成戰鬥機和滑翔機。



圖四十七、
I. leuconoe 和 *I. stoll* 翼型差異

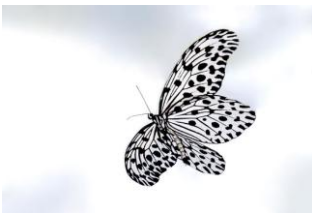
(二) 比較 *Idea stollii* 雌性和雄性之滑翔能力

從文獻的紀錄發現 *Idea stollii* 雌雄型態不同，實驗結果也顯示雌性比雄性有更高的升阻比。*I. stollii* 雄蝶與雌蝶的前翅長度（翼展）極為接近，但雄蝶的前翅寬度（弦長）卻比雌蝶小，也就是更為細長、展弦比更大的翅膀。因此面積就得縮減，而且在體重雄大於雌的情況下，雄蝶的翼面荷重會略為增加。因此相較之下，雖然雌蝶翅膀大於雄蝶、但雄蝶卻比雌蝶來的重，最終結果為雄蝶滑翔能力略遜於雌蝶。這種雌性體型大於雄性的情況，在自然界中極為常見，經由此實驗，更可了解其在運動能力上的差異。

(三) 前翼角度和蝴蝶滑翔時升阻比的關係

以模型分析（圖三十六）發現 *Idea stollii* 和 *Idea leuconoe* 之前翼角度為 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 時升阻比達到最大值，這是因為翼展已伸到最長，所以展弦比成最大值，誘導阻力減少，升力就增加。

此結果與 *I. leuconoe* 實際觀察結果，以及與 *I. stollii* 之滑翔照片相符（圖四十八～五十一）。證明 *I. leuconoe*、*I. stollii* 會發揮身體結構之最大效率來完成滑翔運動，減少最多體力。



圖四十八、
I. stollii 滑翔照片



圖四十九、
I. stollii 滑翔照片



圖五十、
I. stollii 滑翔照片



圖五十一、
I. stollii 滑翔照片

取自：

<http://www.butterflycircle.com/checklist%20V2/CI/index.php/start-page/startpage/showbutterfly/53>

<http://butterflycircle.blogspot.com/2008/10/butterfly-of-month-october-2008.html>

(四) 展弦比和飛行速度的關係

由圖表（圖三十四）可得知，所比較的三隻蝴蝶 *I. leuconoe*、*I. stollii* 雄、雌當中，在體重極為接近的情況下，展弦比愈高，飛行速率愈慢；展弦比愈低，飛行速率愈快。

這是因為蝴蝶所產生的升力主要是在於支撐其身體重量，當展弦比大者，升力係數高，慢速飛行就已提供足夠升力，所以速度才較慢。且展弦比小時形狀阻力也小，有利於速度的增加。

四、探討 *I. leuconoe*、*Idea stolli* 生態棲地與生活情況

(一) 觀察野生大白斑蝶棲地與飛行情況

研究期間，發現在東北角的龍洞灣（圖五十二）及南雅奇岩（圖五十五）都有大白斑蝶的族群，實際觀察發現，其中龍洞灣海岸邊散佈著爬森藤（圖五十四），葉背佈有大白斑蝶的卵，爬森藤是典型的濱海植物，葉子非常厚並在表面形成蠟狀的角質層，可適應強風、高鹽的環境，果實為蓇葖果，種子有翅，會飛翔，植株可生長於土壤貧瘠地區，因此常見於海岸岩縫當中。

為了產卵在爬森藤上，大白斑蝶勢必飛行於海濱沿岸。大白斑蝶通常在上午出沒，溫度約 28-29°C，艷陽高照過於炎熱就不出沒，出沒時海邊熱對流旺盛而風勢強勁。

海邊岩壁一直有陣陣的海風，而大白斑蝶撲翅頻率本來就不高，當有強風突襲時，他的飛行方式反而更明顯轉為滑翔。大白斑蝶發展此小展弦比之翼型，達到快速、靈活的飛行效果，以完成高抗風性之需求。

成蝶在海濱（龍洞灣）（圖五十二）沿岸及海邊的山谷、山坡（南雅奇岩）（圖五十六）都有發現，該地區常見的開花植物前者為澤蘭、石板菜、番杏、基隆筷子芥，後者澤蘭（圖五十七）、石板菜、銳葉牽牛、濱當歸，可能是牠的蜜源植物，而在南雅奇岩，該山谷區的風較穩定，大白斑蝶會在海邊溪谷間進行更長距離的滑翔運動。



圖五十二、
Google Earth 龍洞灣



圖五十三、
龍洞灣地形



圖五十四、
分布於濱海的爬森藤



圖五十五、
Google Earth 南雅奇岩區



圖五十六、
南雅奇岩區地形



圖五十七、
澤蘭

(二) 藉由網路及文獻資料了解 *Idea stollii*

1. Butterflies of the South East Asian Islands- Vol. II. Pieridae and Danaidae .p.562

棲息於接近溪流邊的森林，常見其愉快的滑翔於樹冠層，在該地並不稀有，可在同時看見數隻出現，但很少成群出現。牠們長時間的飛行令當地人印象深刻，而被稱為 surat，就像邊緣鑲著黑邊的白色風箏。



圖五十八、 *Idea stollii*
正吸食赤楠屬植物

2. Butterflies of Singapore 翻譯節錄

取自 <http://butterflycircle.blogspot.com/2008/10/butterfly-of-month-october-2008.html>

在新加坡有兩種 *Idea* 屬的蝴蝶，Common Tree Nymph (*Idea stollii logani*) 和 Mangrove Tree Nymph (*Idea leuconoe chersonesia*) (圖六十一)，後者在新加坡已相當稀少，所以在蝴蝶園所看到其實是來自台灣的 *Idea leuconoe clara* (即大白斑蝶)

在森林，通常單獨滑翔於樹冠層，有時可看到幾隻在開花的樹上。你看見她飛時，總是寂靜緩慢的輕鬆滑翔過去，且絲毫不費力。翼展為 16~18 公分，雌性較大，雄性受驚嚇時，會伸出毛筆器。正值桃金娘科赤楠屬花季時，牠會出現在森林裡。牠會在清晨時覓食，且會在開花的樹附近飛行整天，當牠滑翔時，就是一個拍攝它的好時機。在飽食花蜜之後，牠們就會停在有陰影的灌木叢，翅膀成張開或緊閉狀。經常在樹冠層上乘風滑翔，但遇到干擾時就會優美的飛下來。

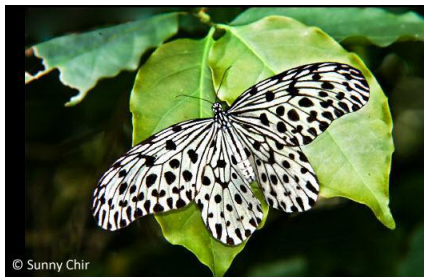
3. Learn about butterflies 翻譯節錄

取自：<http://www.learnaboutbutterflies.com/Malaysia%20-%20Idea%20stollii.htm>

這種蝴蝶常見於初級、次級的雨林和雲霧森林，棲息在海拔 0 到 1200 公尺，早晨時，他們會升到樹冠層吸食桃金娘科蒲桃屬或赤楠屬的植物 (圖五十八)，在下午會五、六隻隨著氣流，緩慢盤旋而下，降落在較大的葉子 (圖五十九)，這些葉子約離地表數公尺高。當陽光充足，雄蝶在休息時翅膀會閉合或完全張開 (圖六十)，隨時準備起飛；在陰天時，長停留在丘陵地的鄉村附近吸食花蜜，此時偶爾拍拍翅膀，如果沒有任何干擾，牠會放鬆的打大大打開雙翅。



圖五十九、
Idea stollii 於葉片上休息



圖六十、
Idea stollii 於葉片上休息



圖六十一、
新加坡的 *Idea leuconoe chersonesia*，為大白斑蝶亞種，所以外型極為相似，棲息於新加坡的河口紅樹林。

取自：

<http://www.butterflycircle.com/checklist%20V2/CI/index.php/start-page/startpage/showbutterfly/53>

<http://www.butterflycircle.com/checklist%20V2/CI/index.php/start-page/startpage/showbutterfly/52>

五、探討型態構造與生態棲地的關係

為何不同地區的同屬蝴蝶其型態構造會有差異？也許可以從棲地找到答案，依照這兩種蝴蝶對幼蟲食草、成蝶蜜源植物之分布，可知道蝴蝶的棲息地。*I. leuconoe* 幼蟲食草為夾竹桃科的爬森藤，所以 *I. leuconoe* 的分布就與爬森藤息息相關。爬森藤屬於濱海植物，生長在海拔 100 公尺以下之海岸地區灌木叢中與海岸珊瑚礁上。因此，*I. leuconoe* 生存於海岸地區。*I. stolli* 幼蟲食草為夾竹桃科的海南香花藤 (wikipedia-*Idea stolli*)，此植物分布於海拔 500~1700 公尺 (維基百科-海南香花藤)，成蟲的蜜源植物為桃金娘科蒲桃屬或赤楠植物，海南香花藤、桃金娘科蒲桃屬及赤楠植物都是分布於內陸次生林的植物。因此此兩種蝴蝶的棲地是不同的。

本研究推論翅膀的型態是適應棲息環境之風的特性而演化出來的結果。

推論理由如下：

- (一) *I. leuconoe* 的棲地因位於海濱，考慮到當地的風向因素：風勢強勁，且風向紊亂，較不穩定。為了適應此環境，*I. leuconoe* 演化出展弦比較小的翼型，具有阻力小、靈活度高的特性，抗風性較 *I. stolli* 佳，更適合生存於風大的飛行空間。
- (二) 棲息於次生林的 *I. stolli*，因棲地位於內陸，其風勢比沿海地帶穩定許多，讓 *I. stolli* 有更好的飛行場，去乘風完成省力的滑翔飛行，因此 *I. stolli* 可發展出比 *I. leuconoe* 更為細長，展弦比更高，更利於滑翔的翼型。可善用此功能型態，於樹林間完成長距離、長時間且更優異的滑翔。

柒、結論

一、發展研究蝴蝶飛行的方法

- (一) 經由觀察蝴蝶，成功模仿出其滑翔仿生模型，並利用模型完成活體無法達成之測試。
- (二) 在無法取得活體的情況下，發展以同屬品種、標本圖鑑完成仿生模擬。
- (三) 以物理流體力學之方法量化分析 *I. leuconoe* 與 *I. stolli* 在功能上的差異。

二、探討 *Idea leuconoe* 和 *Idea stolli* 翅膀的型態構造差異與滑翔能力的關係

- (一) 因為 *I. stolli* 展弦比高於 *I. leuconoe*，所以滑翔能力更佳，滑翔速率也愈慢。
- (二) 實驗結果顯示當 *I. leuconoe* 和 *I. stolli* 模型之前翼角度為 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 時，升阻比達到最大值，此角度範圍與實際活體相同，證明這兩種蝴蝶會將型態構造 (翅型) 調整到最合適的姿勢來滑翔。

三、推論型態構造與棲地的關係

一一推論此翅膀變異，是兩者為了因應棲息地的風之特性，而演化適應之結果

- (一) *I. leuconoe* 棲息於海濱，風勢紊亂，發展出較渾圓翅型，更適合風大環境。
- (二) *I. stolli* 棲息於次生林，風勢穩定，發展出較細長翅型，更適合省力滑翔。

捌、延伸探討

五月份時，持續到準園觀察大白斑蝶飛行，巧遇正遷徙到北部的紫斑蝶。紫斑蝶有越冬遷徙的習性，這使我聯想到其他會遷徙的蝴蝶，如美洲帝王斑蝶、在臺灣與日本間飛行的大青斑蝶等等。因為研究過程所養成的經驗與習慣，使我開始依循研究內容，仔細思索著這些蝴蝶，他們的身體大小、翅膀形狀、飛行特性與棲地、遷徙、飛行空間，是否也有關係？

在紀錄片蝴蝶密碼中，提及紫斑蝶（圖六十三~六十六）和大青斑蝶（圖六十二），這兩種會遷徙的蝴蝶，前者於臺灣本島隨著季風做南北向遷徙，而後者則越海到日本避暑。兩者不但在遷徙路徑有陸地與海洋的差別，更發現在翅型上也有所不同，也許兩者是有關聯的。

為了進一步了解牠們，便前往北投貴子坑及陽明山國家公園大屯山主峰，觀察紫斑蝶和大青斑蝶在野外的實際飛行，發現在大屯山這種風勢強勁的高山上，大青斑蝶除了吸蜜時飛下來，其他時間很愛離開樹叢等遮蔽物，以滑翔兼撲翅的飛行方式，到高空乘著強風飛行。可見這種蝴蝶有能力在高空進行跨海遷徙，而紫斑蝶多在樹冠層下吸蜜，滑翔快速且靈活。

同樣的，比較展弦比也許可略知他們的滑翔特性（表十五），越冬遷徙的紫斑蝶共有四種，端紫斑蝶翅形是最細長的，拿它來和大青斑蝶比較，得知大青斑蝶的展弦比較大。依照研究 *Idea* 屬得的結論：展弦比大，擅於滑翔；展弦比小，擅於靈活飛行，推測因越過陸地的紫斑蝶，途中沿著山脈飛到南部後，又需急降到山谷中，飛行空間的高度變化率高，需要低展弦比來靈活應變各種環境；而大青斑蝶是直接從陽明山出發，開始不著陸地越海遷徙到日本，要在高空長距離飛行，所以提高展弦比增加升力，以達到節省力氣。

表十五、大青斑蝶與端紫斑蝶之展弦比比較

	大青斑蝶	端紫斑蝶
展弦比	3.462	2.849



圖六十二、
大青斑蝶



圖六十三、
端紫斑蝶



圖六十四、
斯氏紫斑蝶



圖六十五、
圓翅紫斑蝶



圖六十六、
小紫斑蝶

取自：李俊延、王效岳。1997年。臺灣冬天的蝴蝶谷。臺北市：省博物館。

做了以上的初步探討，可略知翅型和遷徙時的飛行高度、遷徙路徑、氣流特性似乎有一定的關係，但是因為時間的關係無法深入探討，未來將可沿用本研究利用仿生模型進行滑翔分析，配合實際觀察及測量蝴蝶遷徙路徑的風速、風向，在風洞內模擬山地與海面的地形差異，加上氣流變化、風速不同等等參數，以了解蝴蝶的飛行性能，驗證兩種蝴蝶的翼型差異，是否是因應兩種不同的遷徙路線之飛行空間，所演化適應的結果。

世界上僅有兩種以成蝶越冬的蝴蝶，其一是墨西哥的帝王蝶，另一個就是台灣的紫斑蝶，為了了解與保育帝王蝶，該國政府投資巨額在保育並研究，甚至以輕航機跟隨帝王蝶飛行，以實際觀察其飛行情況，相較之下，台灣對紫斑蝶的研究較著重型態及遷徙路線，若能更深入分析飛行性能，將可提供更全面的保育觀念。

玖、參考資料及其他

一、參考文獻

- (一) 小林 昭夫。2003 年 12 月。圖解飛機的構造與原理。新北市：世茂出版集團。
- (二) 鈴木 真二。2004 年 04 月。萊特兄弟與飛行。新北市：世茂出版集團。
- (三) 林柏昌、林有義。2008 年。蝴蝶食草圖鑑。台北市：知己圖書股份有限公司。pp.209.210
- (四) 林春吉。2008 年。臺灣蝴蝶食草與蜜源食物大圖鑑(下)。台北市：天下遠見出版股份有限公司。pp.80.81
- (五) 李俊延、王效岳。1997 年。臺灣冬天的蝴蝶谷。臺北市：省博物館。
- (五) Butterflies of Singapore.2008/10.取自：
<http://butterflycircle.blogspot.com/2008/10/butterfly-of-month-october-2008.html>
- (六) Lepidoptera and some other life forms.取自：
http://ftp.funet.fi/index/Tree_of_life/insecta/lepidoptera/ditrysia/papilionoidea/nymphalidae/danainae/idea/index.html
- (七) Osamu Yata & Kazuhiko Morishita .1985/05 .Butterflies of theSouth East Asian Islands-Vol.II. Pieridae and Danaidae.pp.154-163,515-528

二、名辭解釋

- (註 1) 滑降比
飛行器無動力滑翔時的前進距離與下降高度之比值。
- (註 2) 升阻比
升力與阻力的比值，是飛行器飛行能力的重要指標之一。其值愈大代表飛行效率愈高。
- (註 3) 誘導阻力
因為機翼上下兩面之壓力差，而讓下表面的氣流經由翼端翻上來上表面，進而生成漩渦，導致誘導阻力的產生。這種阻力會削減升力，所以兩者成反比，誘導阻力愈大升力就愈小。為了減少誘導阻力，將機翼變細，也就是展弦比提高，翼端弦長也隨之縮短，就可減少升力的損失。
- (註 4) 翼面荷重
飛行器每平方單位之翼面所必須承受的飛行器重量。
- (註 5) 翼展
飛機主翼的長度，研究中用於蝴蝶前翅的長度。
- (註 6) 弦長
飛機主翼的寬度，研究中用於蝴蝶翅膀平均寬度。
- (註 7) 展弦比
翼展與平均弦長的比值。增加展弦比可以增加升阻比和升力係數，也就是提高飛行效率。因此滑翔機都採用細長的機翼。

【評語】 030316

1. 結合流體力學觀念透過仿生模型研究蝴蝶翅膀型態差異與飛行效率之關係，觀察能力及動手做實驗能力俱佳。
2. 利用風洞研究飛行在前幾屆科展已有類似作品宜再比較探討。