

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 生物(生命科學)科

040703

展翅高飛--探討台灣十三種斑蝶翅膀特性

學校名稱：國立武陵高級中學

作者： 高二 陳瑋杰 高二 劉友文 高二 楊宜澤 高二 魯世譽	指導老師： 蔡靜宜 李金祝
---	---------------------

關鍵詞：斑蝶 風阻 結構

壹、摘要

本實驗目的為測量台灣地區斑蝶科 (Danaiidae) 蝴蝶翅膀的特性，進而探討其與飛行能力之相關性，以及紫斑蝶翅膀幻色的物理呈色原因。由結果得知，就前翅而言，面積大小及最大翅長兩者皆與風阻實驗中的速度呈現正相關；而翅膀展弦比及親疏水性則和其風阻實驗中的速度較無顯著的相關性。此外，幻色實驗中利用光學顯微鏡與掃描式電子顯微鏡得知斑蝶幻色的形成和其鱗片的細微結構與排列方式有密切相關。我們推論斑蝶的鱗片細微結構與排列皆會影響其幻色的形成，也可能造成風阻不同，而影響飛行的速度。

貳、研究動機

偶然間由國家地理頻道播出的【蝴蝶密碼】得知，日本有一種青斑蝶會從日本遠度重洋遷徙至台灣，且據報導顯示，斑蝶具有超過 2000 公里的長途遷徙能力，遷徙的過程中需橫渡一大片海洋，這途中並沒有供青斑蝶歇腳的地點，更沒有讓其可補充能量的休憩站，這引發我們對蝴蝶飛行的好奇心。我們認為蝴蝶在遠渡重洋的過程中，勢必將以最省力的方式節省體力的消耗，來完成這趟旅程，而這解密的關鍵可能與蝴蝶的翅膀有著密不可分的關係。於是我們進一步與台灣蝶會研究員詹家龍先生討論得知，台灣有許多人正進行著蝴蝶標放的工作，且台灣島內有多種蝴蝶每年皆會進行集體的季節性移動；再者，由於台灣向來更有「蝴蝶王國」的美喻，因此，在考量了眾多因素並分析實際狀況後，配合高二生命科學下冊第六章第四節【動物的行為】，我們決定以台灣的斑蝶為主題，探討台灣現有的十三種斑蝶翅膀結構及其特性，以期進一步瞭解其與飛行的相關性，除此之外，我們也將對蝴蝶翅膀的幻色現象進行相關研究。

參、研究目的

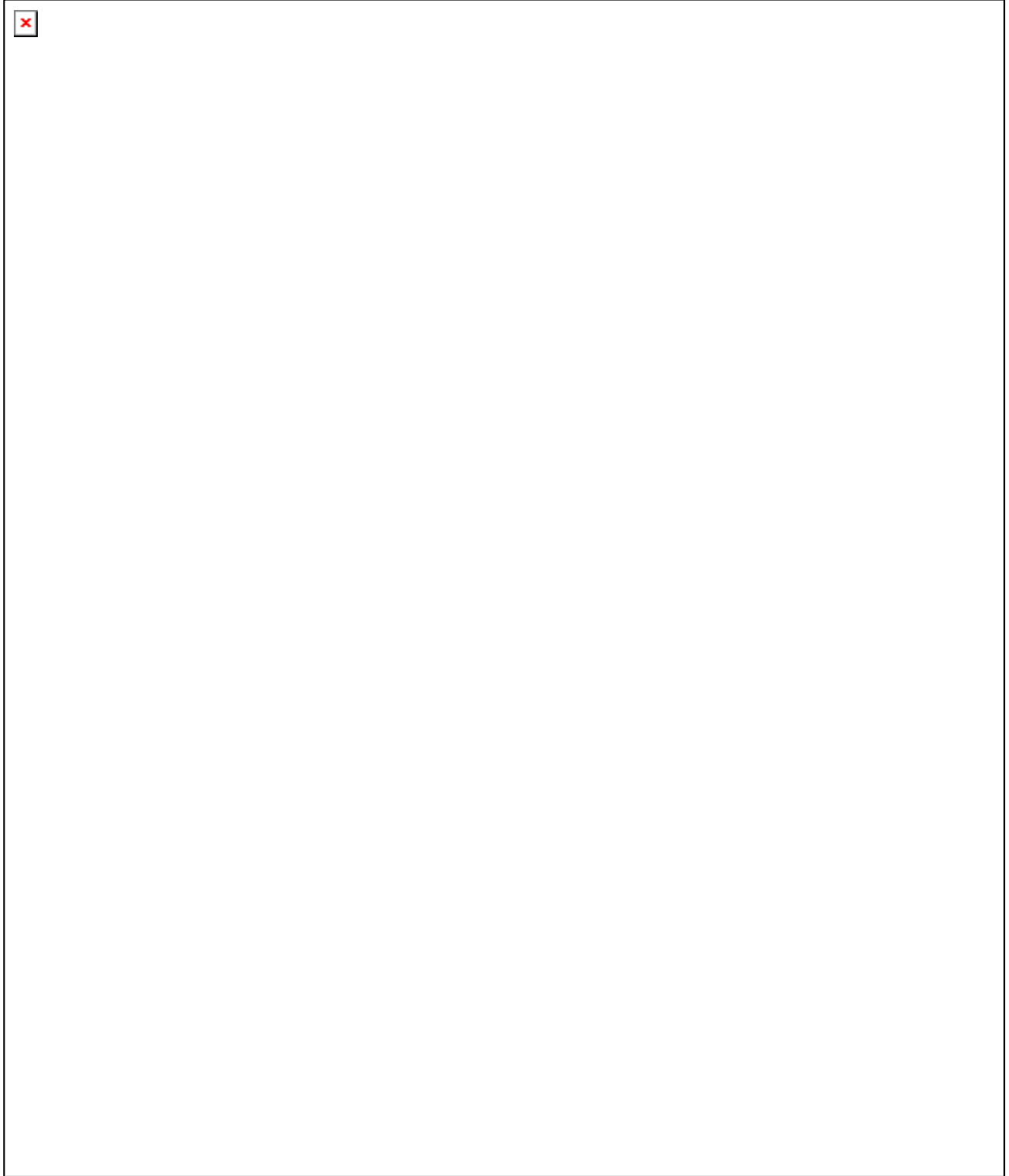
由於蝴蝶翅膀的多種特性可能都會對飛行造成不同的影響，因此本實驗主要目的為針對十三種斑蝶翅膀進行基本物理測量，並設計風阻實驗比較各種蝴蝶翅膀的相對受力大小，與基本物理測量進行相對比較，最後再進一步分析比較翅膀表面微細結構及親疏水特性，希望能獲得蝴蝶季節性移動能力的基礎資料。除此之外，我們也將探討紫斑蝶翅膀幻色部位呈色原因，以期對斑蝶翅膀有更深入的了解。

肆、研究設備及器材

十三種斑蝶樣本	光學顯微鏡	掃描式電子顯微鏡	微量吸取器
游標尺	微量天平	數位照相機	Corel Draw 12 軟體
自製風口	計時器	電源供應器	自製暗室
鋁箔紙	珍珠板	塑膠板	光源

《註》斑蝶種類：斯氏紫斑蝶、圓翅紫斑蝶、端紫斑蝶、小紫斑蝶、樺斑蝶、黑脈樺斑蝶、小青斑蝶、小紋青斑蝶、姬小紋青斑蝶、淡紋青斑蝶、琉球青斑蝶、大青斑蝶、大白斑蝶。

◎ 斑蝶照片與名錄：



大白斑蝶
Idea leuconoe clara (Butler)

伍、研究過程

一、 探討十三種斑蝶翅膀的整體結構

(一) 測量翅膀面積，並探討翅膀面積與風阻的相關性

1. 先將蝴蝶翅膀投影並將其翅膀外形描繪於鋁箔紙上。
2. 剪下這些翅形紙片，秤出重量。
3. 以均勻鋁箔紙秤重並求出單位重量的面積。
4. 將重量數據分別乘以單位重量的面積，即其翅膀面積。



置於微量天平上的鋁箔翅膀



量測數據

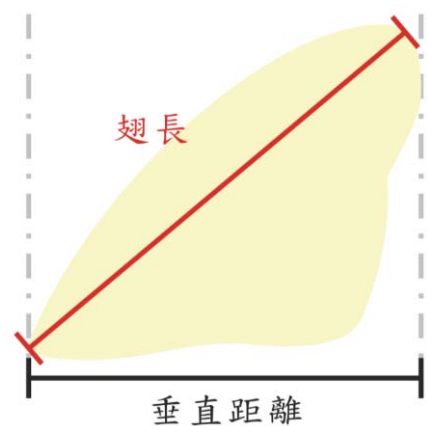
(二) 測量最大翅長，並探討最大翅長與風阻的相關性

1. 以游標尺測量十三種斑蝶的最大翅長。

(三) 測量展弦比，並探討展弦比與風阻的相關性

剪下右前翅

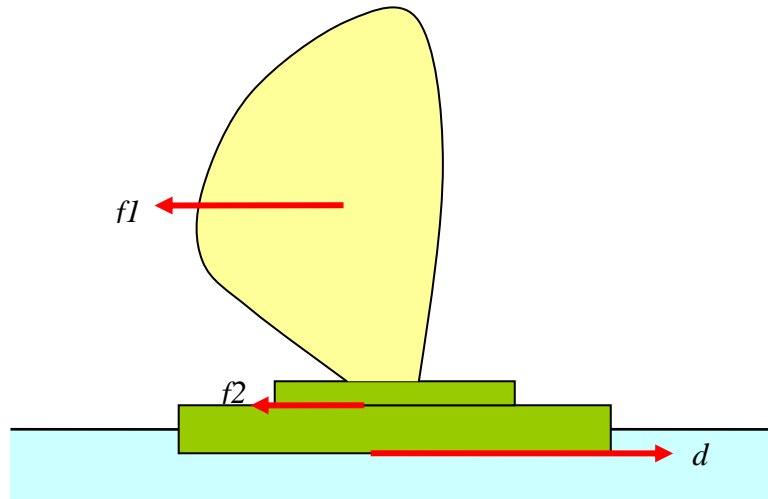
1. 翅長：以游標尺測得蝴蝶右前及後翅的翅長，測量數值包括有前翅與腹部垂直距離(如下圖所繪垂直距離)、前翅最大翅長(又稱為翼展，如下圖所繪翅長)及後翅最大翅長(如下圖所繪翅長)。
2. 將翼展平方除以翅膀表面積，得蝴蝶翅膀的展弦比。



二、將十三種斑蝶翅膀進行風阻實驗

(一) 自製風阻測量裝置

1. 將翅膀立置於盛載物上，並經由整流過的風吹向翅膀。
2. 利用其在行經固定距離所需的時間，推得蝴蝶整片翅膀的相對速度。



=>當船等速運動時，在水平方向的合力等於零，所以

$$d = f1 + f2 \quad (1)$$

=> d 為船在水面移動所受的阻力， $f1$ 為空氣流過蝴蝶翅膀的作用力， $f2$ 為空氣流過船體的作用力，故未裝上蝴蝶翅膀的船所受的阻力(d_b)為

$$d_b = f2 \quad (2)$$

=>假設船在水面移動的阻力與速度的關係如下：

$$d = cv \quad (3)$$

=>其中 c 為水的黏滯係數， v 為船的速度，則式(2)可寫為

$$d_b = f2 = cv_b \quad (4)$$

=>其中 v_b 為船未裝上蝴蝶翅膀時的速度，由式(1),(3),(4)可得蝴蝶翅膀所受的空氣阻力 $f1$ 為

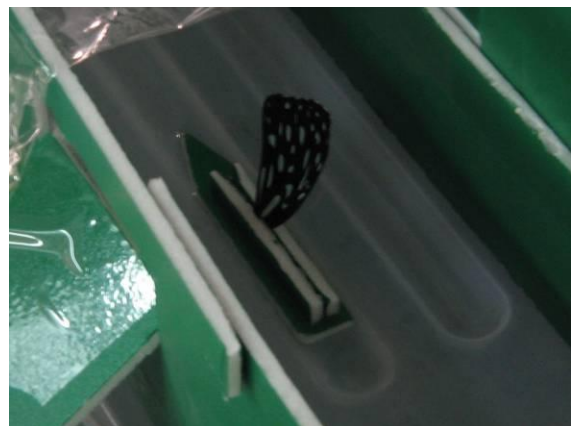
$$f1 = d - f2 = cv - cv_b = c(v - v_b) \quad (5)$$

=>因蝴蝶翅膀很薄，可忽略翅膀前投影面積的風阻效應，則單位面積蝴蝶翅膀所受風阻為

$$f = \frac{c(v - v_b)}{A}$$



自製風阻實驗裝置



測量中的樣本

三、 探討十三種斑蝶翅膀的細微結構

(一) 翅膀之親、疏水性

1. 利用微量吸取器在蝴蝶翅膀上滴上一滴 $2\mu\text{l}$ 定量的水珠並拍照。
2. 利用Corel Draw測量出水珠附著於不同種斑蝶翅膀上時橢圓球形水滴的短軸與長軸，即可比較其親疏水性的差異。



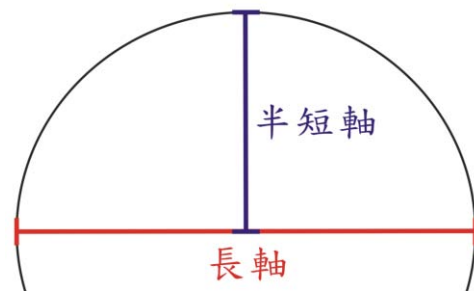
微量吸取器



以微量吸取器滴定量水滴於翅膀上



於蝴蝶翅膀上的水滴

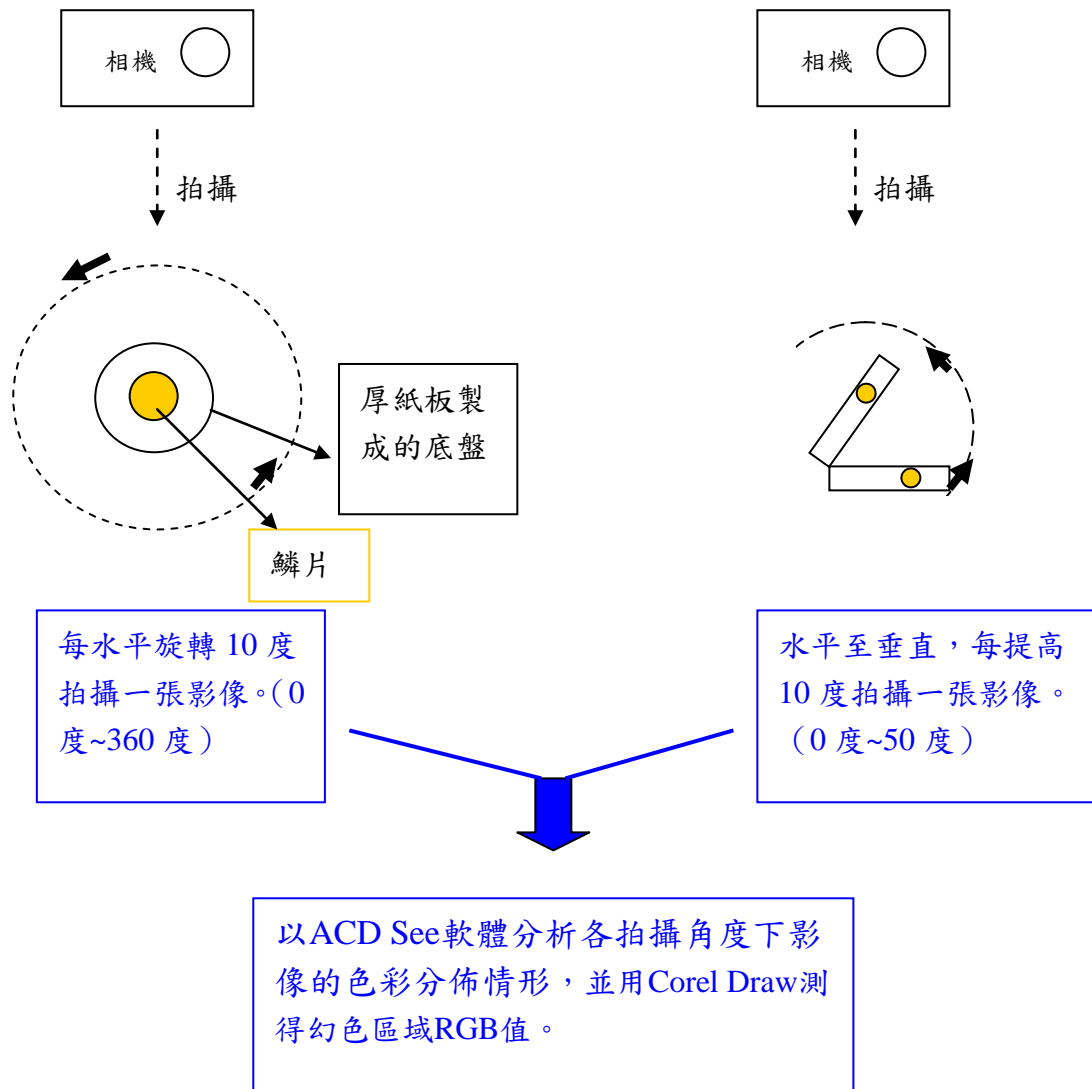


水珠示意圖

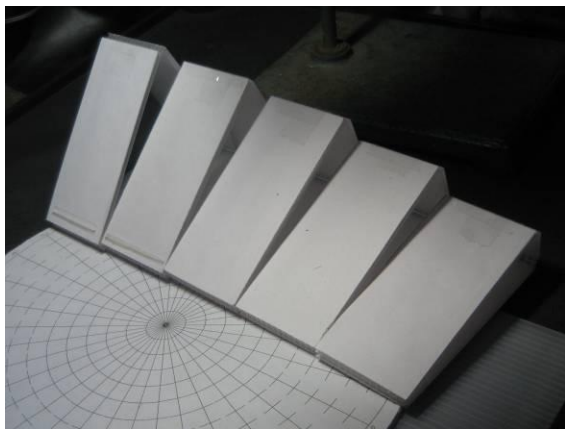
四、 探討四種紫斑蝶的幻色現象與鱗片表面的微構造：

(一) 以不同入射角的可見光照射鱗片，觀察鱗片反射後的成像結果並加以量化

1. 於自製的暗室內將蝴蝶翅膀置於360度平面旋轉盤上，正上方架設數位照相機與穩定的光源。
2. 每水平旋轉10度拍攝一張影像、垂直角度10度拍攝一張影像，直至水平360度旋轉完一周、垂直50度拍攝完成為止。
3. 以ACD See軟體分析各拍攝角度下影像的色彩分佈情形，並用Corel Draw測得幻色區域RGB值(三元色-紅、綠、藍三色值)。

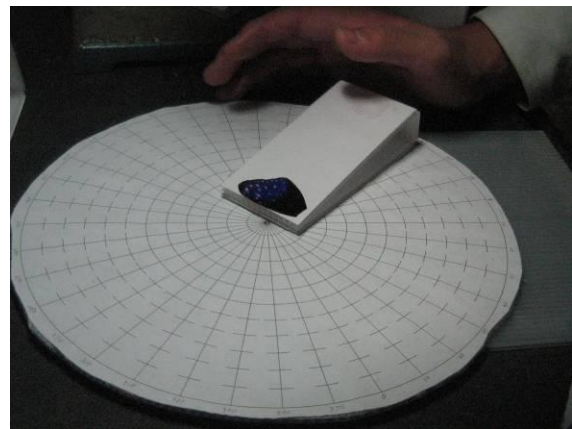


自製暗室



測量底座 (仰角十度至五十度)

自製暗室內部



仰角十度、水平三十度的端紫斑蝶樣本

(二) 以掃描式電子顯微鏡觀察紫斑蝶鱗片微構造並探討其物理色成因

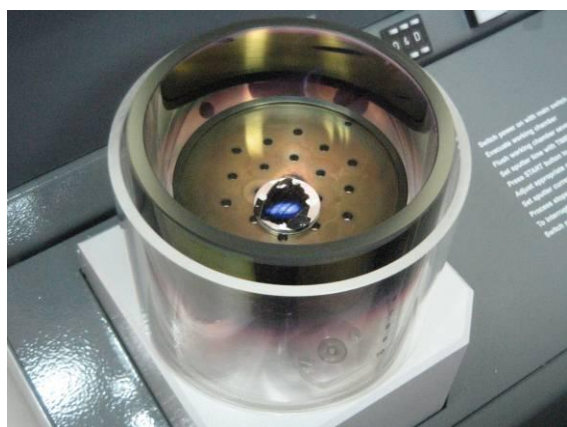
1. 準備四種紫斑蝶翅膀樣本。
2. 將欲選取區域之樣本取下（同時含幻色區與無幻色區）。
3. 利用掃描式電子顯微鏡擷取相關影像檔。
4. 分析影像檔並加以整理。



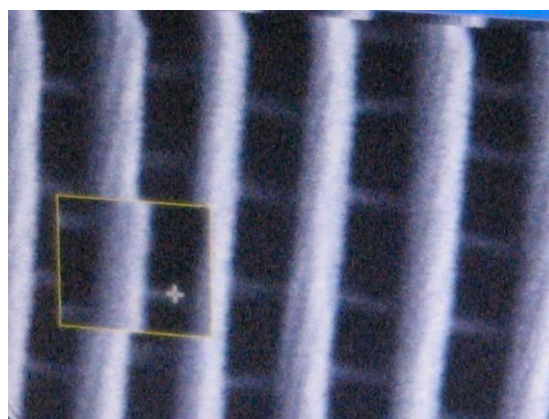
SEM掃描式電子顯微鏡



擷取欲測區域的翅膀樣本



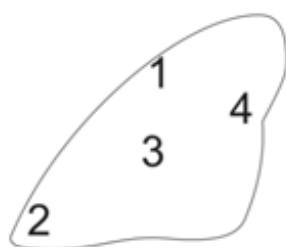
將蝶翅樣本置於鍍金機內



聚焦中的影像

(三) 以光學顯微鏡觀察並比較十三種斑蝶鱗片微構造 (10×40x)

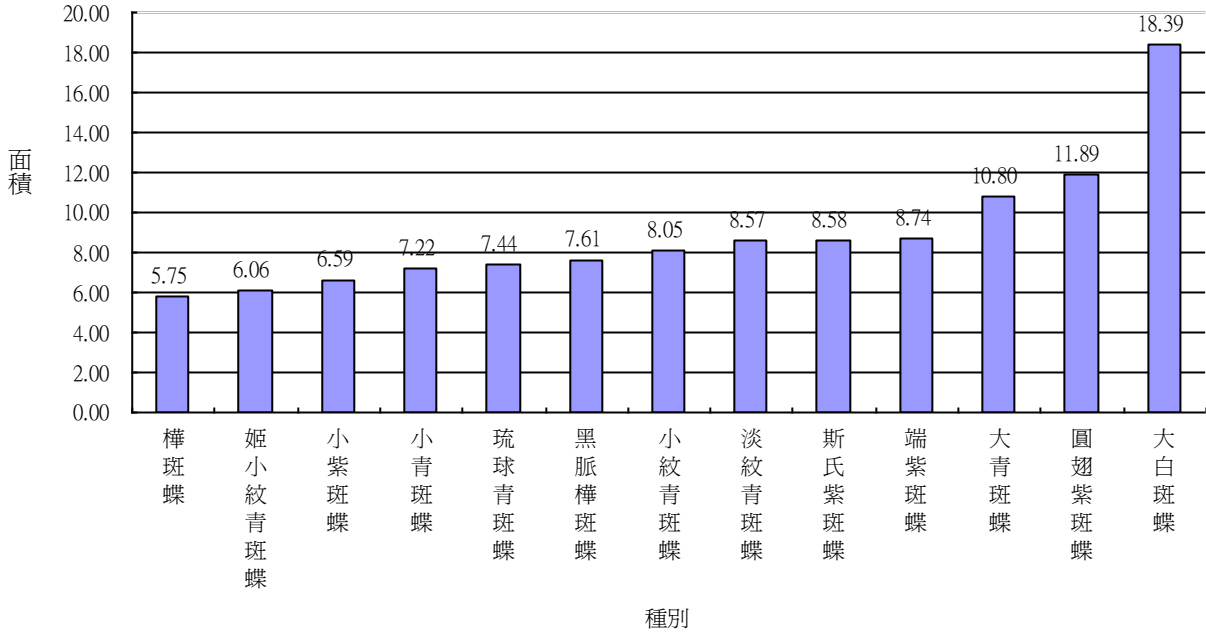
1. 十三種斑蝶翅膀表面的細微結構以光學顯微鏡 (10×40) 測量、觀察、拍照並加以比較，拍照區域如下圖所示。



陸、研究結果

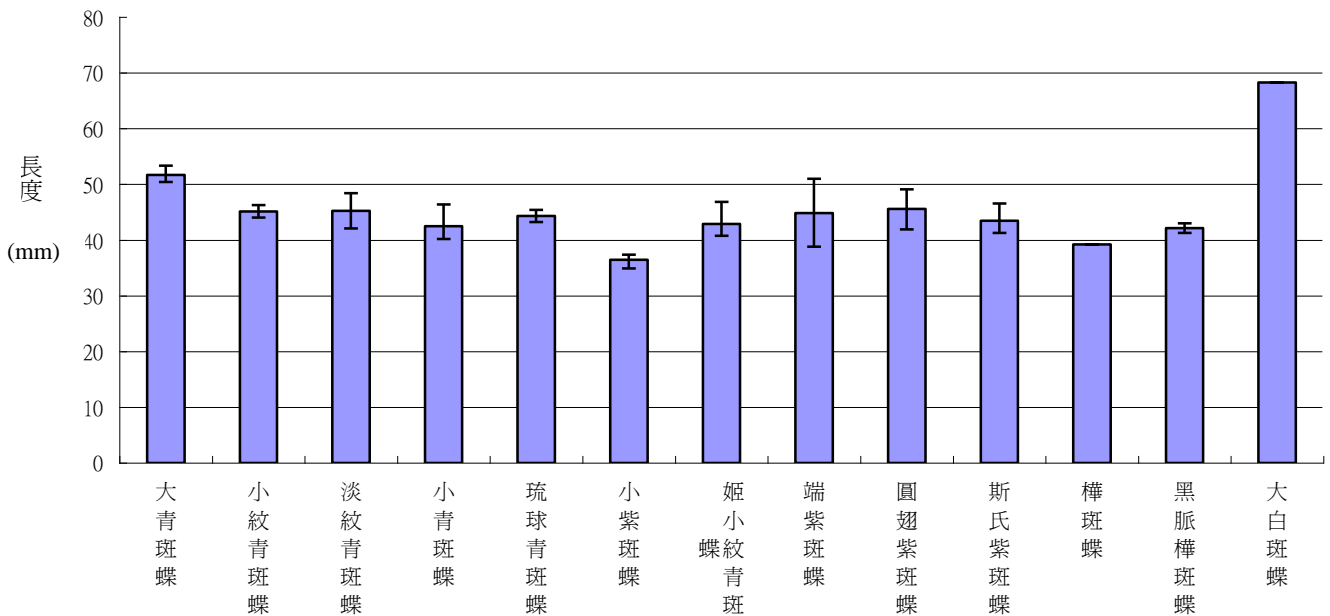
一、探討十三種斑蝶翅膀的整體結構

(一) 測量翅膀面積



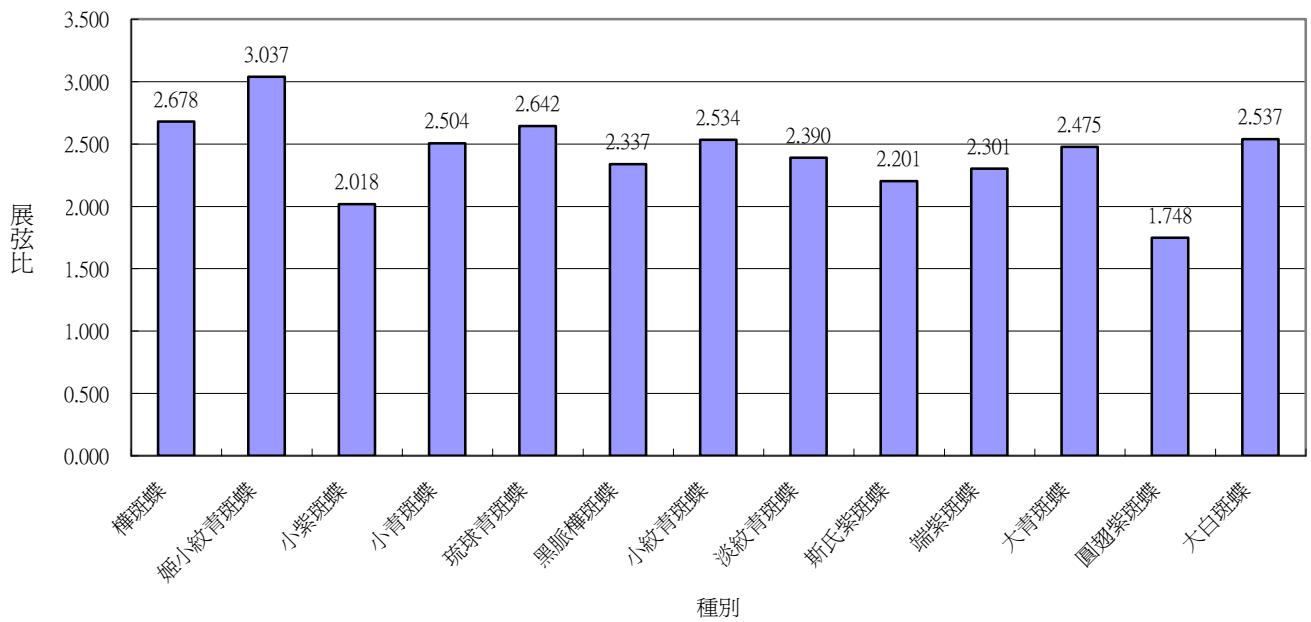
圖一 十三種斑蝶前翅面積的比較圖

(二) 測量最大翅長



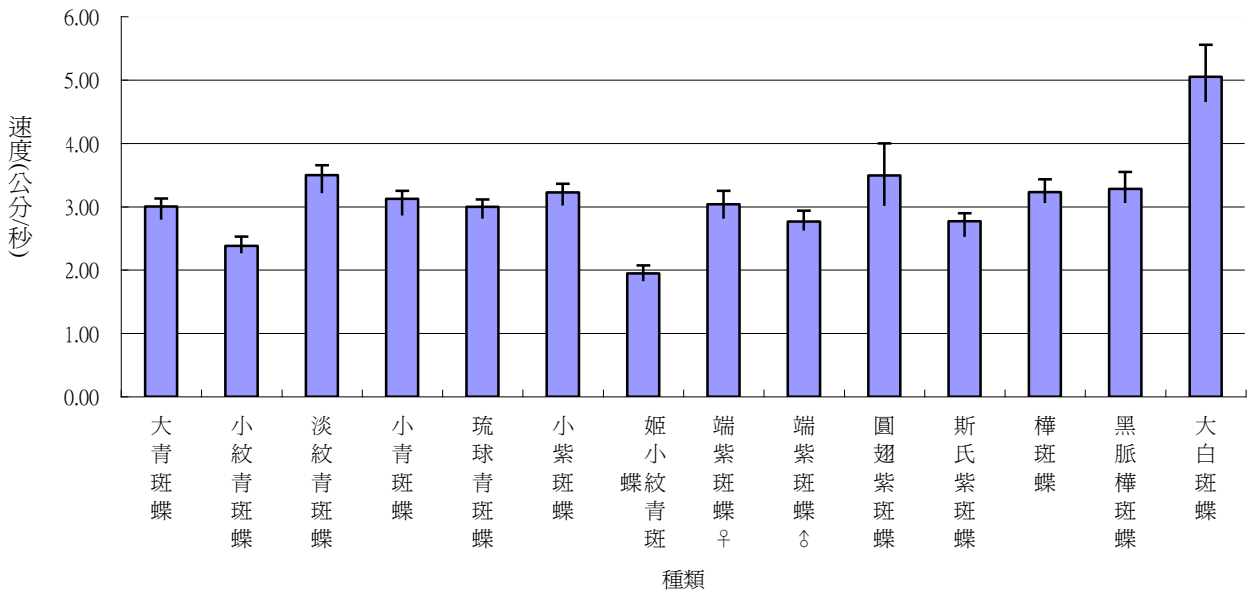
圖二 十三種斑蝶前翅最大翅長

(三) 測量展弦比

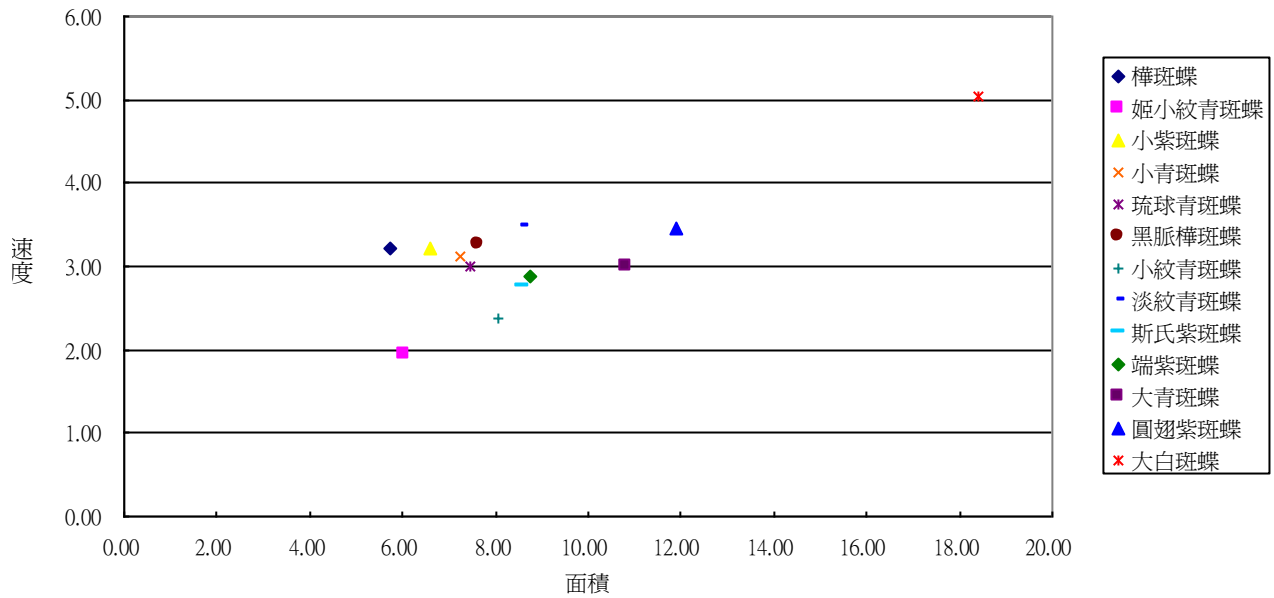


圖三 十三種斑蝶前翅展弦比

二、將十三種斑蝶翅膀進行風阻實驗

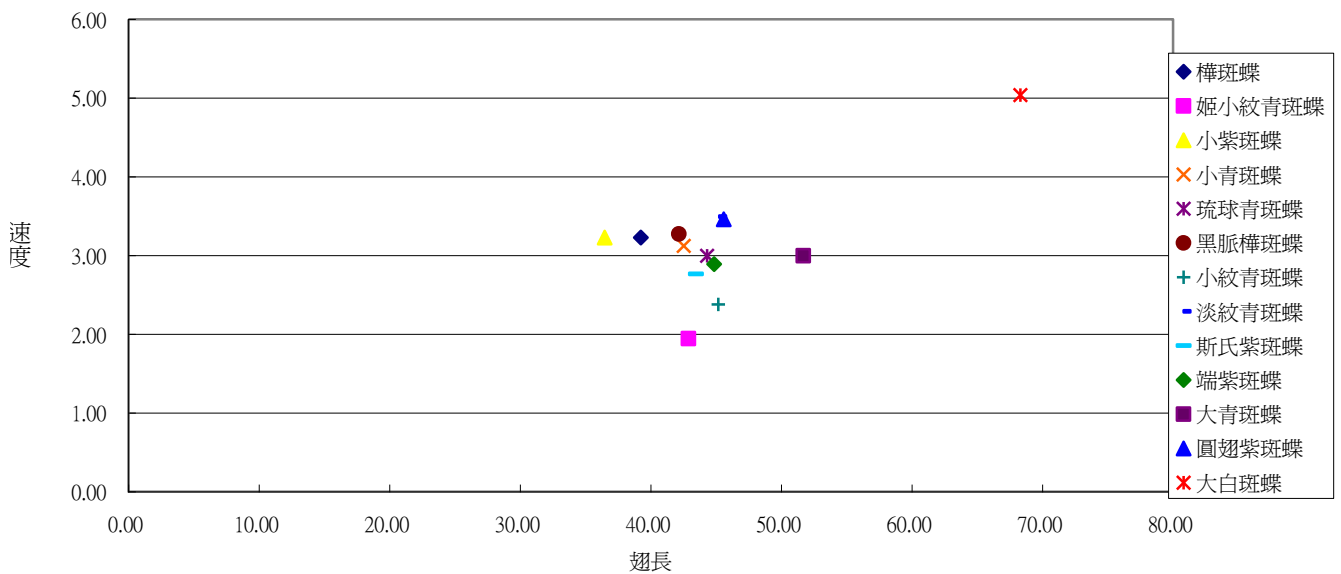


圖四 十三種斑蝶前翅風阻實驗之速度



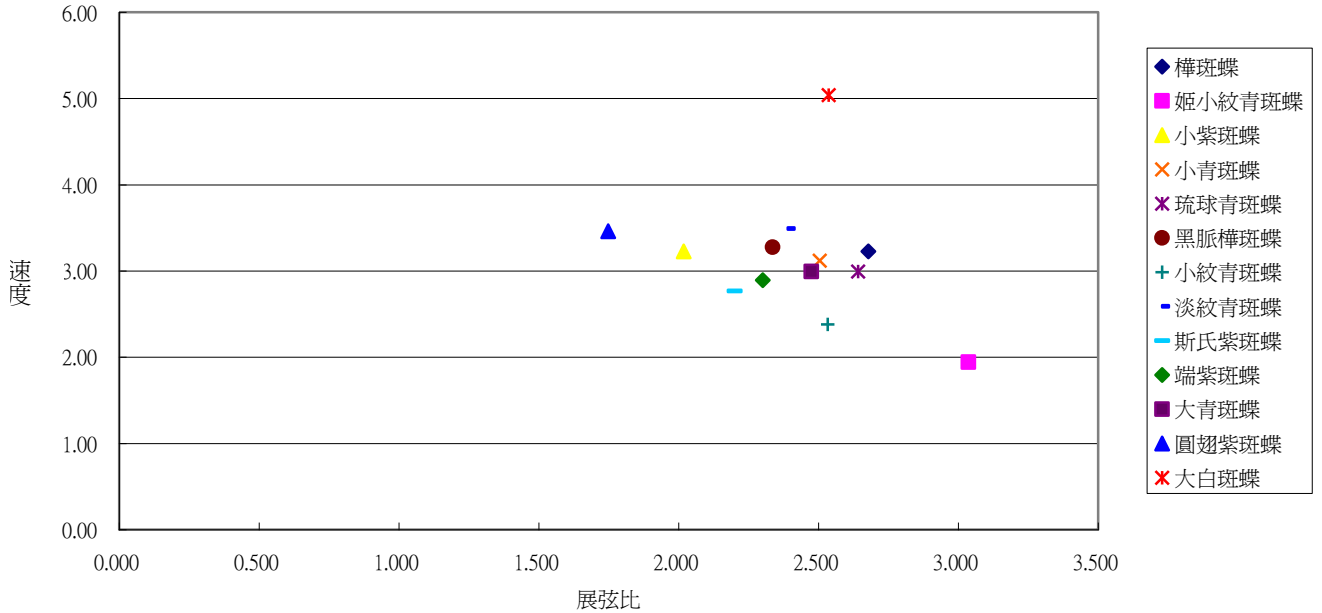
圖五 十三種斑蝶前翅面積與風阻實驗速度之關係

結果：我們將十三種斑蝶前翅面積與速度的實驗數據進行統計分析，結果 $R=0.783326$ ，達顯著相關性，即蝴蝶翅膀面積與其風阻實驗中的速度成顯著的正相關，因此由此實驗中，可發現較大的翅膀面積其風阻實驗速度也較快。



圖六 十三種斑蝶前翅最大翅長與風阻實驗速度之關係

結果：我們將十三種斑蝶前翅最大翅長與速度的實驗數據進行統計分析，結果 $R=0.683154$ ，達顯著相關性，由本實驗結果，我們發現：較大的翼展在實驗中擁有較快的速度，可說是會造成較大的阻力，進而在較短的時間內將翅膀帶到終點。

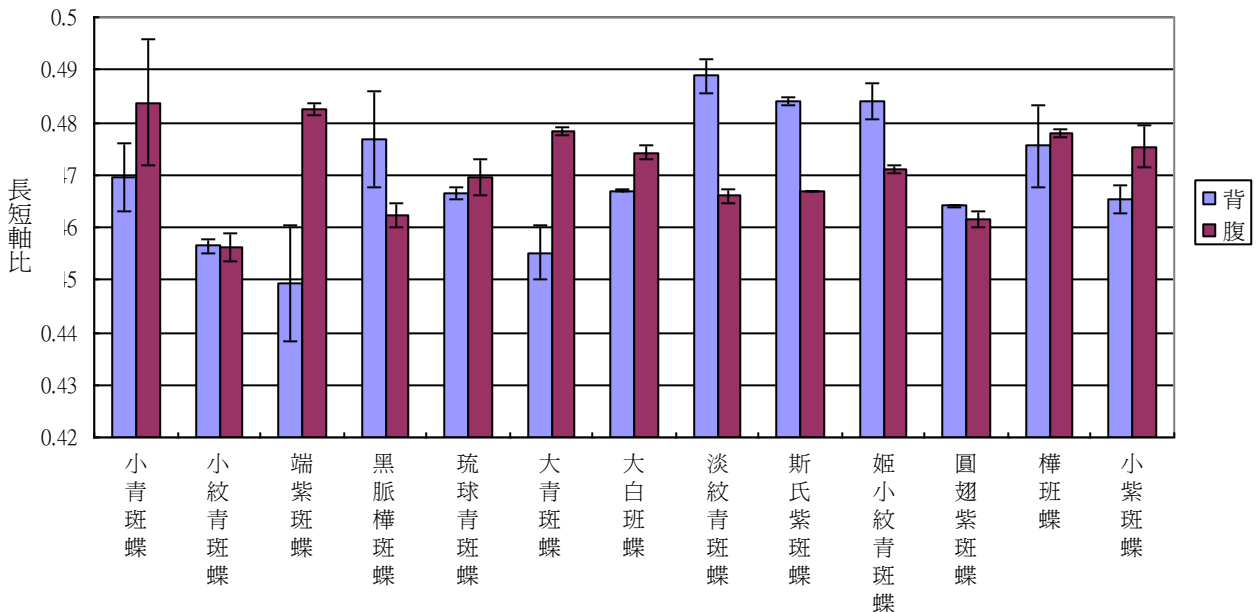


圖七 十三種斑蝶前翅展弦比與風阻實驗速度之關係

結果：我們將十三種斑蝶前翅展弦比與速度的實驗結果進行統計分析， $R=0.287054$ ，並沒有達顯著相關性，即斑蝶前翅展弦比大小與速度之間的相關性並不高。

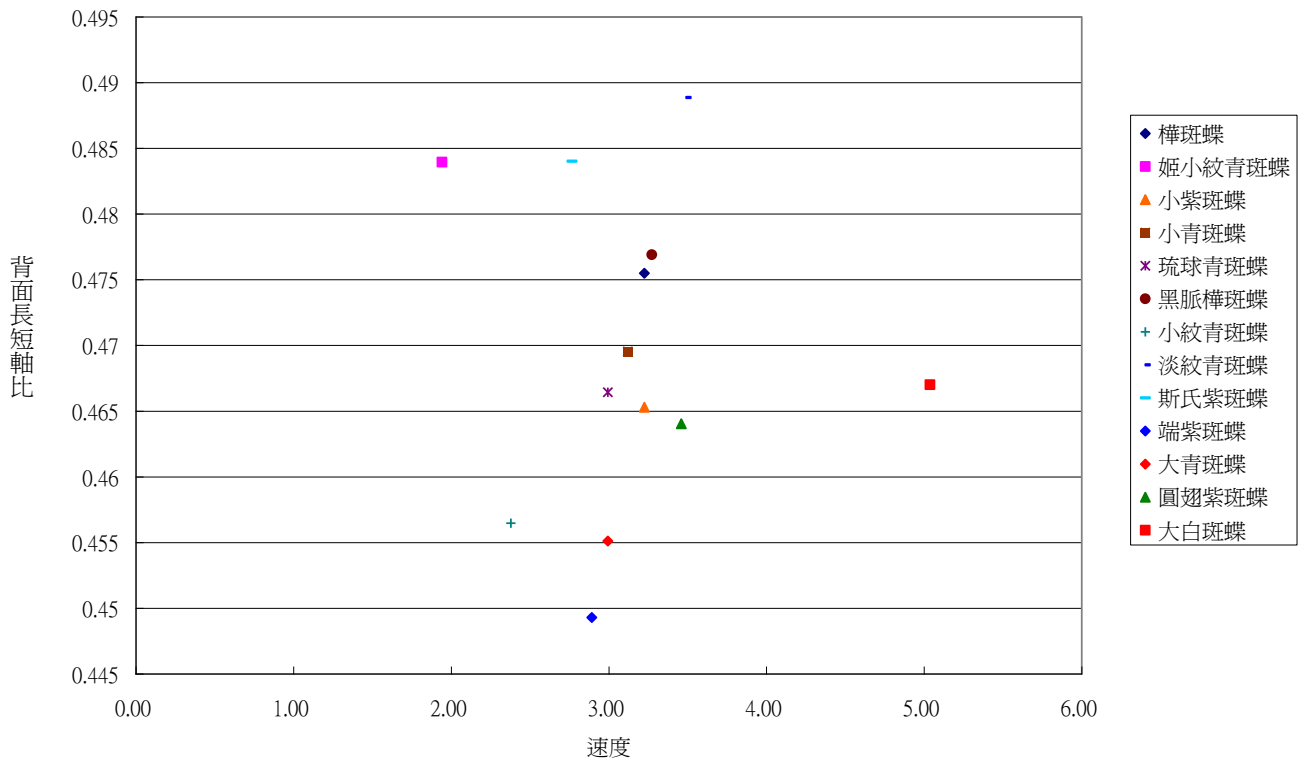
三、 探討十三種斑蝶翅膀的細微結構

(一) 翅膀之親、疏水性



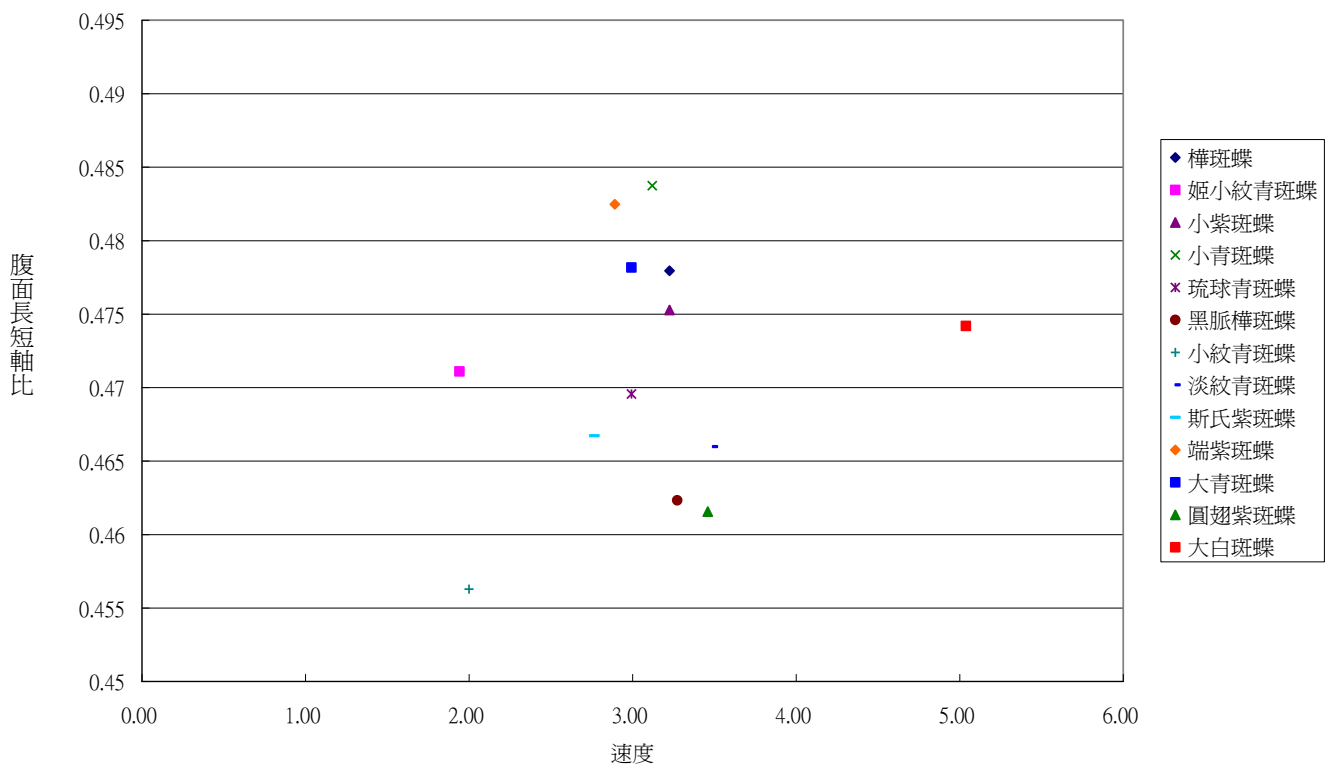
圖八 十三種斑蝶前翅背腹面橢圓水珠之長短軸比

結果：由十三種斑蝶前後翅腹面及背面橢圓水珠之長短軸比的實驗中發現：不同的斑蝶其腹面、背面的親疏水程度也有所不同。



圖九 十三種斑蝶前翅背面橢圓水珠之長短軸比與風阻實驗速度之關係

結果：我們將十三種斑蝶前翅背面橢圓水珠之長短軸比與速度的實驗結果進行統計分析， $R=0.098995$ ，並沒有達顯著相關性，即斑蝶前翅背面橢圓水珠之長短軸比與速度相關性並不高。



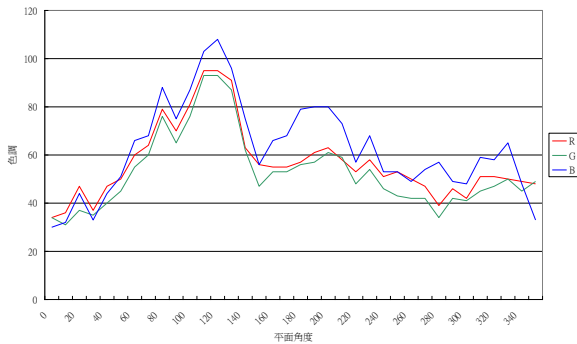
圖十 十三種斑蝶前翅腹面橢圓水珠之長短軸比與風阻實驗速度之關係

結果：我們再進行十三種斑蝶前翅腹面橢圓水珠之長短軸比與速度之關係比較，進行統計分析， $R=0.160312$ ，並沒有達顯著相關性，即斑蝶前翅腹面橢圓水珠之長短軸比與速度相關性並不高，亦即斑蝶翅膀的親疏水性和斑蝶的飛行速度並沒有顯著的相關性。

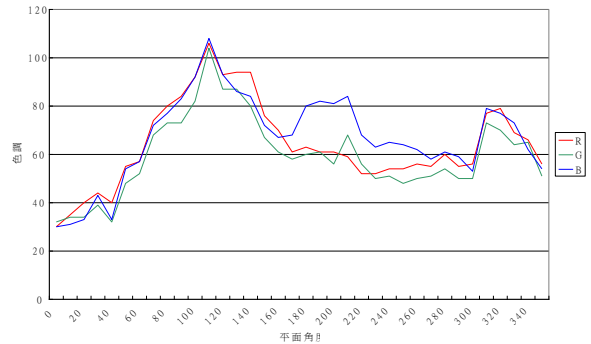
四、 探討四種紫斑蝶的幻色現象與鱗片表面的微構造：

(一) 以不同入射角的可見光照射鱗片，觀察鱗片反射後的成像結果並加以量化

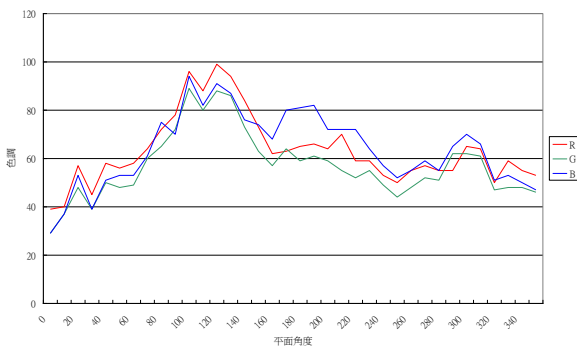
斯氏紫斑蝶



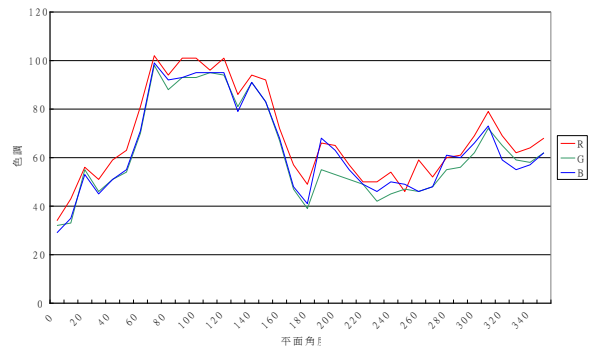
(仰角十度)



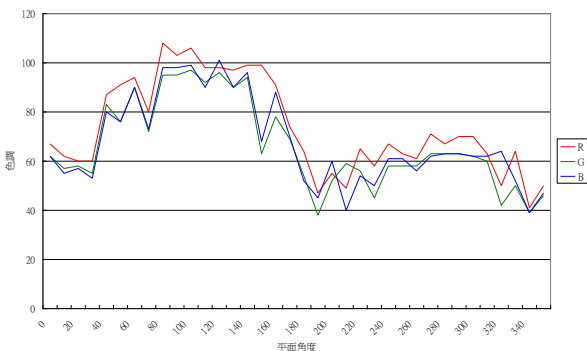
(仰角二十度)



(仰角三十度)



(仰角四十度)

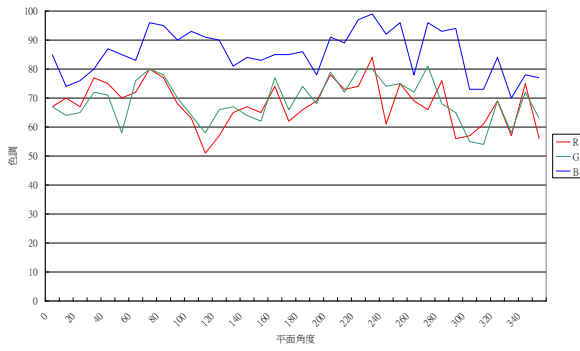


(仰角五十度)

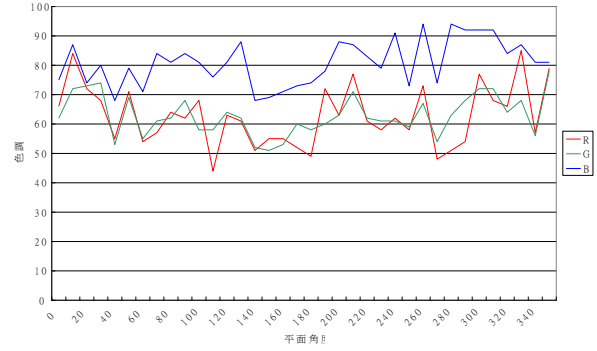
圖十一 斯氏紫斑蝶幻色區域由仰角十度至仰角五十度之 R G B 值

【說明】隨著仰角的升高，斯氏紫斑蝶 B 曲線（藍色即肉眼所見之色）越較 R、G 曲線低，且尖峰較平緩（幻色明顯的平面角度擴大）。亦即隨著仰角的升高，幻色越趨模糊。

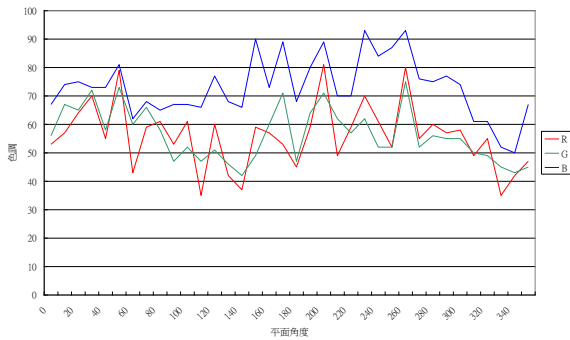
小紫斑蝶



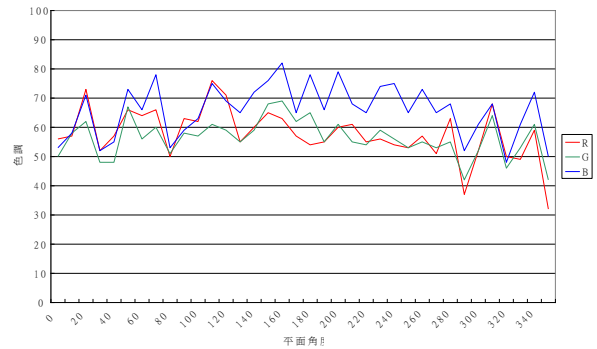
(仰角十度)



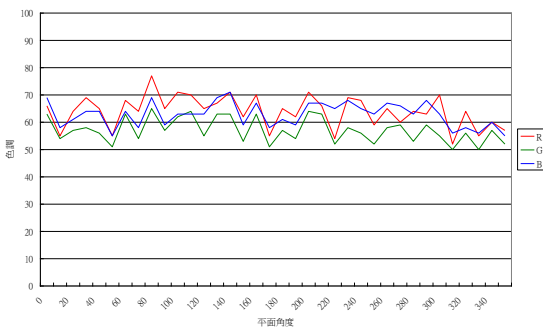
(仰角二十度)



(仰角三十度)



(仰角四十度)

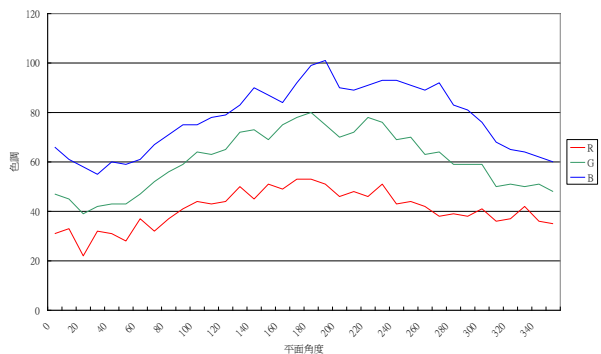


(仰角五十度)

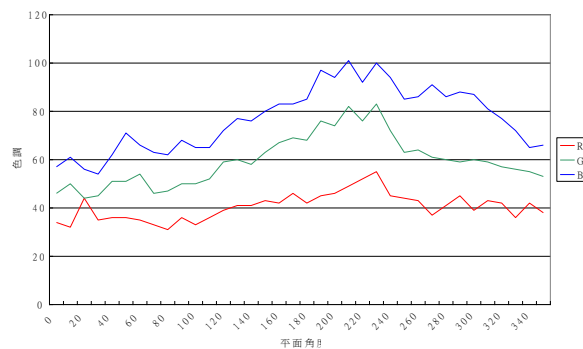
圖十二 小紫斑蝶幻色區域由仰角十度至仰角五十度之 R G B 值

【說明】整體而言是平面角度三百六十度皆幻色明顯。隨著仰角的升高，小紫斑蝶 B 曲線（藍色即肉眼所見之色）不斷降低且從遠高於 R、G 到混雜於其中。意即隨著仰角的升高，幻色越趨不明顯。

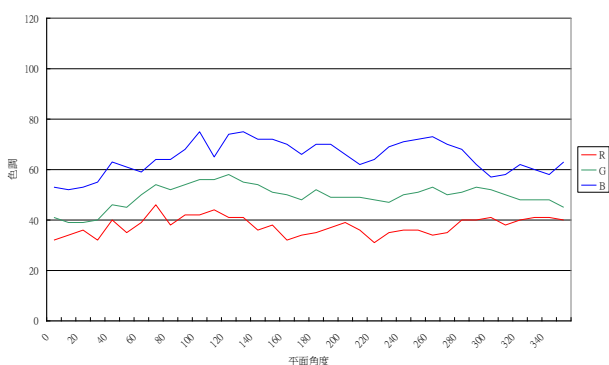
圓翅紫斑蝶



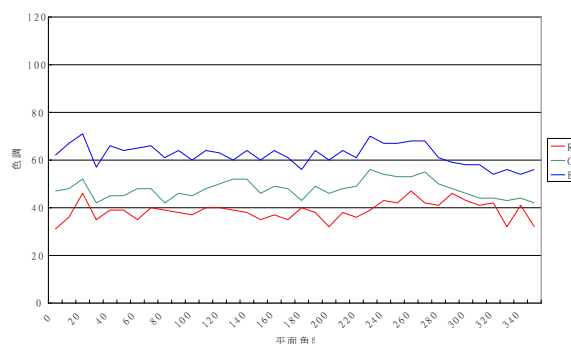
(仰角十度)



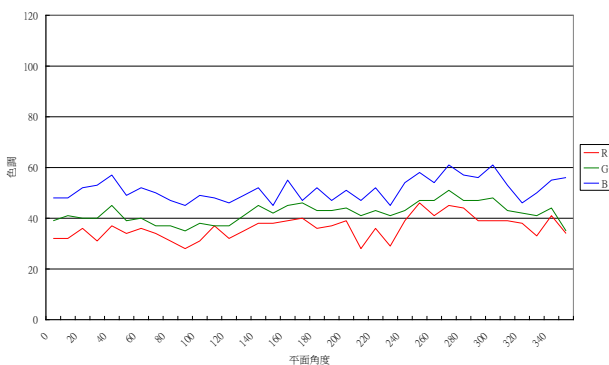
(仰角二十度)



(仰角三十度)



(仰角四十度)

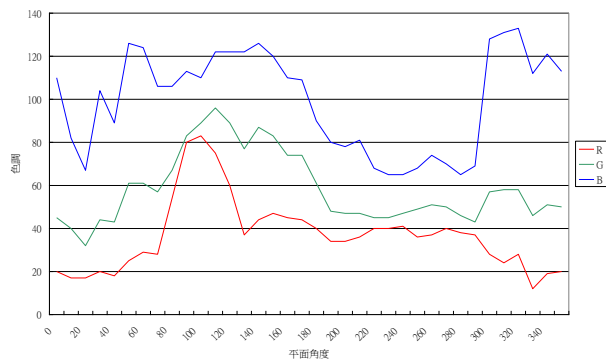


(仰角五十度)

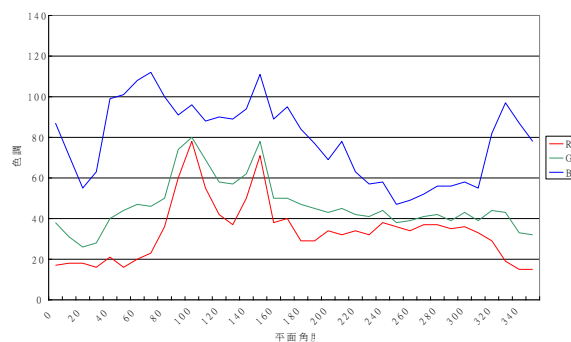
圖十三 圓翅紫斑蝶幻色區域由仰角十度至仰角五十度之 R G B 值

【說明】整體而言 B 曲線無論在平面三百六十度皆高於 R、G 曲線，意即藍色較其他色明顯。隨著仰角的升高，圓翅紫斑蝶不僅 B 曲線（藍色即肉眼所見之色）降低，且 R、G 曲線也同時降低。亦即隨著仰角的升高，不單是幻色越趨模糊，且整體顏色趨於黯淡。

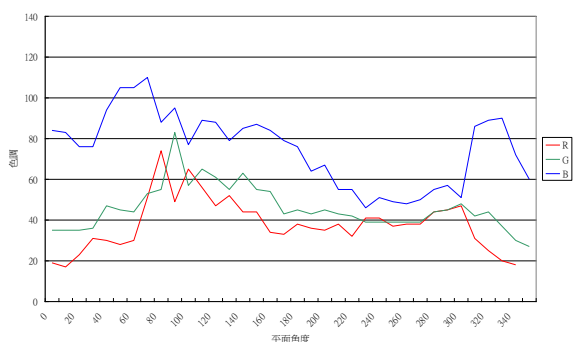
端紫斑蝶



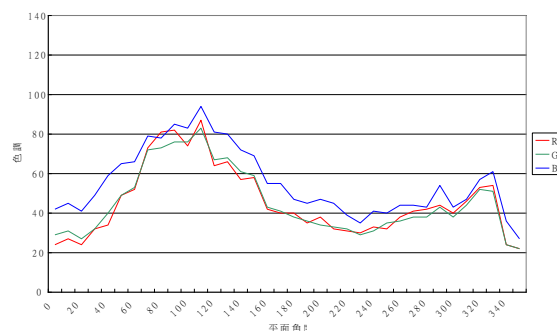
(仰角十度)



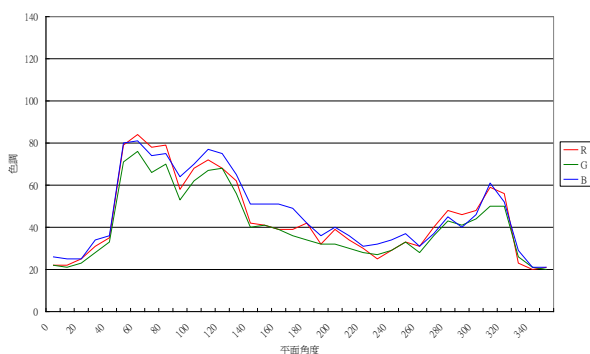
(仰角二十度)



(仰角三十度)



(仰角四十度)



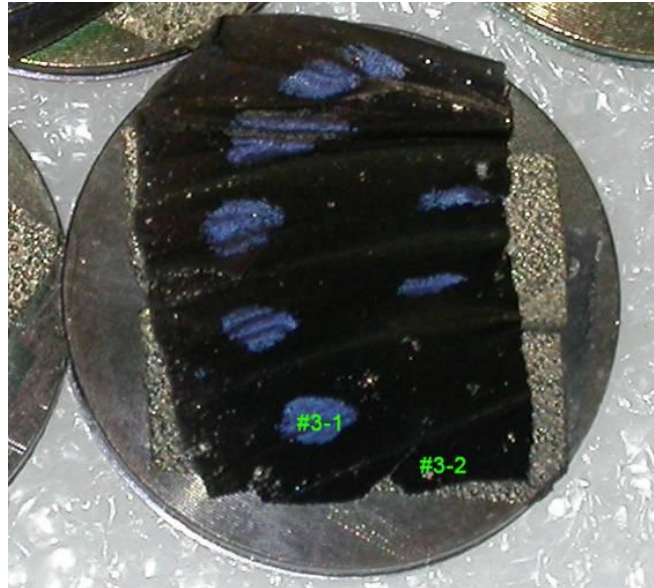
(仰角五十度)

圖十四 端紫斑蝶幻色區域由仰角十度至仰角五十度之R G B值

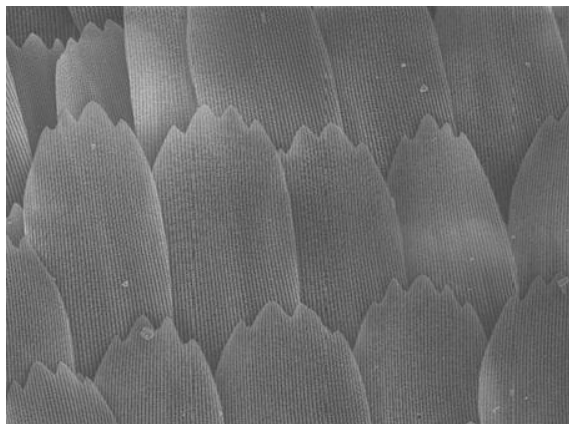
【說明】端紫斑蝶在仰角較低的時候，很明顯的可以看出B曲線遠高於R、G曲線，亦即此時幻色極為明顯。然而，隨著仰角的升高，整體的RGB值也降低，不僅幻色變得較不明顯，整體也變的較暗。而幻色區最明顯的平面角度並無大幅的改變。

結果：斑蝶中的紫斑蝶具有美麗的幻色，對人眼而言紫斑蝶其幻色的「色」即為藍或紫色。由擷取出幻色區域的RGB值可得知，隨著仰角的提升，不僅幻色逐漸變的較不明顯，連整體的顏色都較仰角較小時黯淡（RGB值「整體」若大，代表越接近白色，顏色越亮，應該反射出來的光線會較多）。並且，隨著仰角的增高，RGB值最高與最低之間的差異也漸漸縮小。鱗片會因為光線不同的照射情況而顯現出不同的顏色，而翅膀上不只有一種鱗片，因此才有幻色區域與無幻色區域之差別。鱗片在不同角度光照下，因為細微結構所造成的不同反射光，在巨觀下即可測得不同的RGB值。

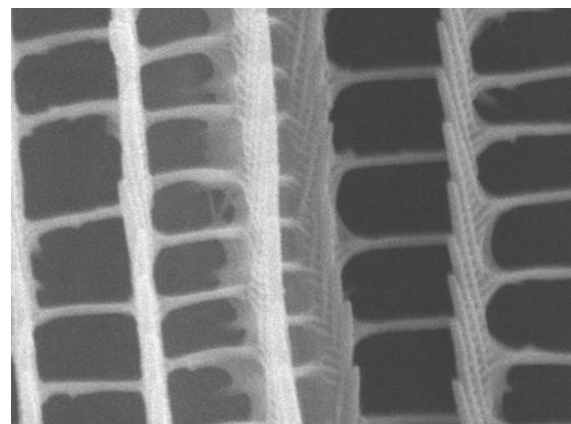
(二) 以掃描式電子顯微鏡觀察紫斑蝶鱗片微構造並探討其物理色成因



圓翅紫斑蝶取樣位置示意圖

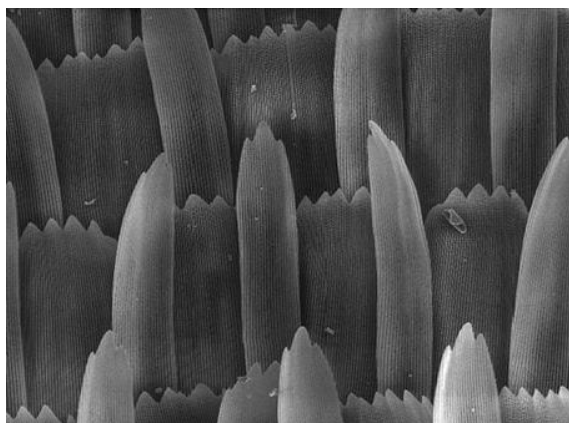


圓翅紫斑蝶 # 3-1 (1000 倍)

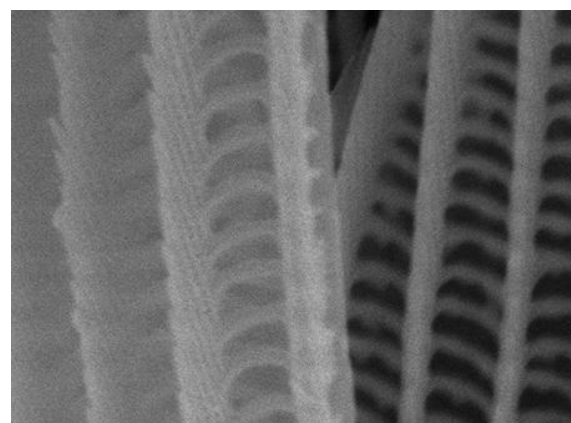


圓翅紫斑蝶 # 3-1 (40000 倍)

【說明】寬圓鱗片緊密排列。



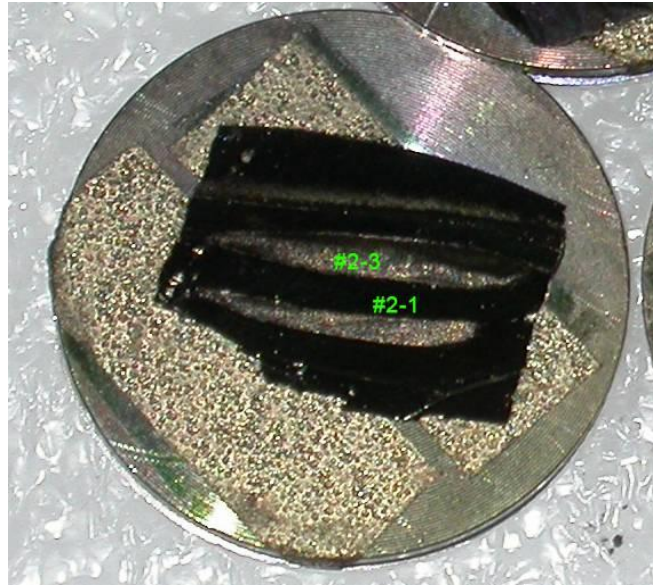
圓翅紫斑蝶 # 3-2 (1000 倍)



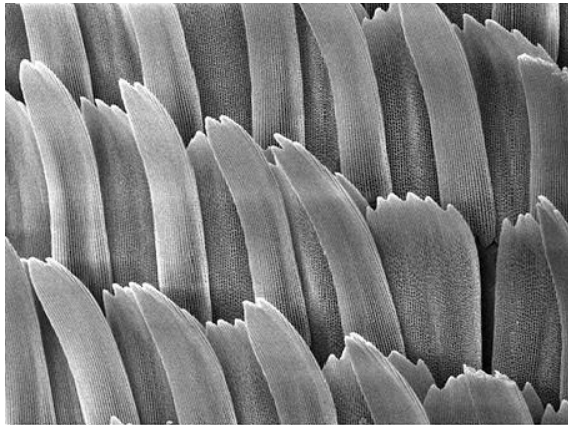
圓翅紫斑蝶 # 3-2 (40000 倍)

【說明】寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。

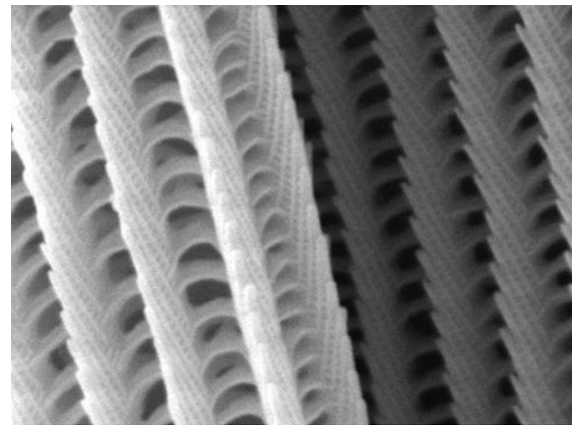
圖十五 以電子顯微鏡觀察圓翅紫斑蝶翅膀不同區域與不同倍率下的細微結構



斯氏紫斑蝶取樣位置示意圖

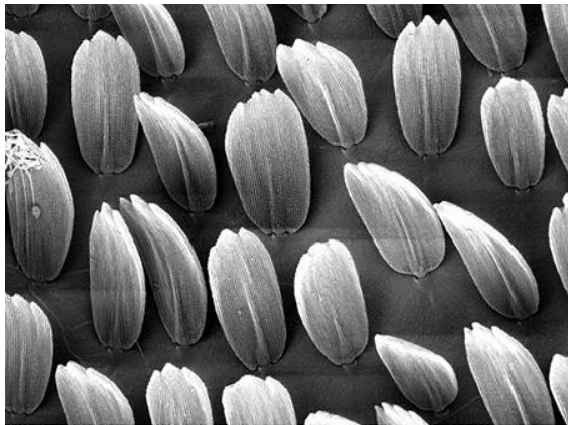


斯氏紫斑蝶 # 2-1 (1000 倍)

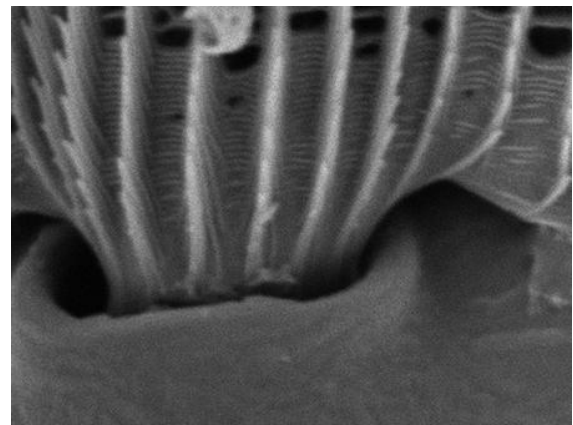


斯氏紫斑蝶 # 2-1 (40000 倍)

【說明】寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。



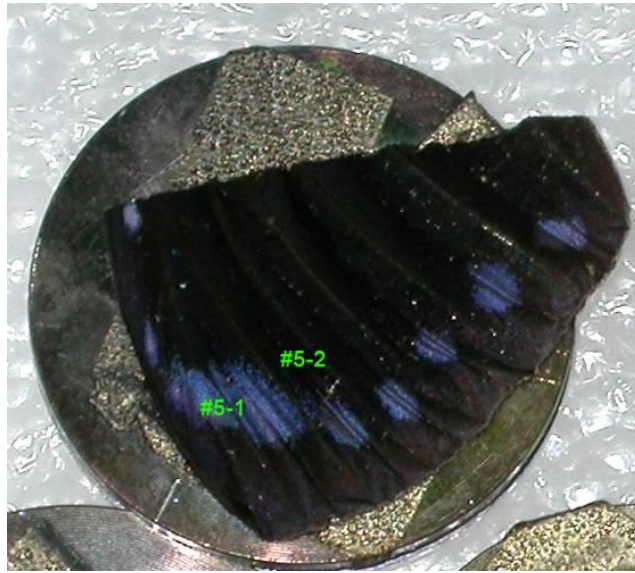
斯氏紫斑蝶 # 2-3 (1000 倍)



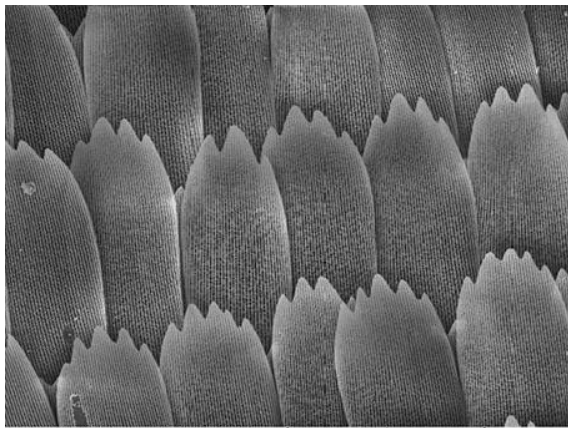
斯氏紫斑蝶 # 2-3 (30000 倍)

【說明】寬圓鱗片及疏鬆排列。

圖十六 以電子顯微鏡觀察斯氏紫斑蝶翅膀不同區域與不同倍率下的細微結構



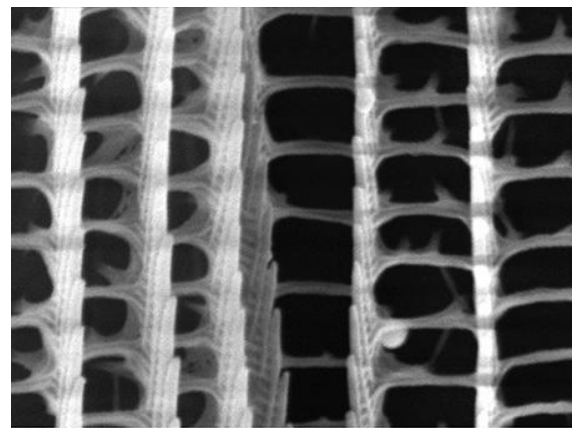
小紫斑蝶取樣位置示意圖



SEM MAG: 1.00 kx DET: SE Detector
 HV: 10.00 kV administrator
 VAC: HiVac WD: 16.2450 mm
 Vega ©Tescan TNIT

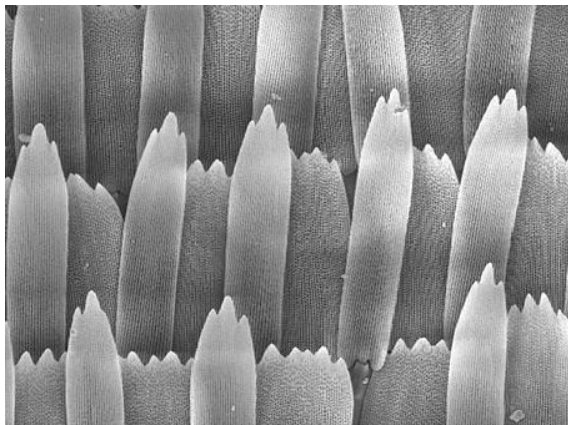
小紫斑蝶 # 5-1 (1000 倍)

【說明】寬圓鱗片緊密排列。



SEM MAG: 40.00 kx DET: SE Detector
 HV: 10.00 kV administrator
 VAC: HiVac WD: 16.2450 mm
 Vega ©Tescan TNIT

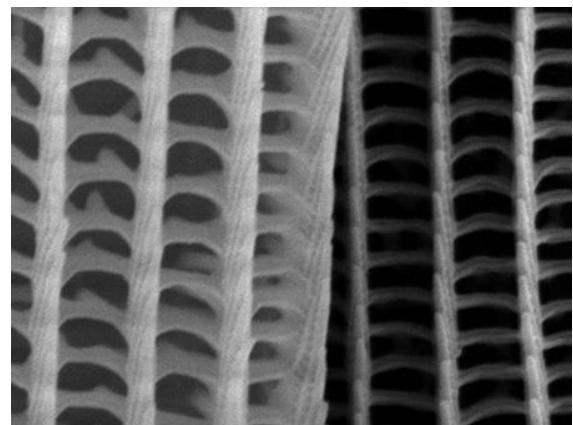
小紫斑蝶 # 5-1 (40000 倍)



SEM MAG: 1.00 kx DET: SE Detector
 HV: 10.00 kV administrator
 VAC: HiVac WD: 16.7850 mm
 Vega ©Tescan TNIT

小紫斑蝶 # 5-2 (1000 倍)

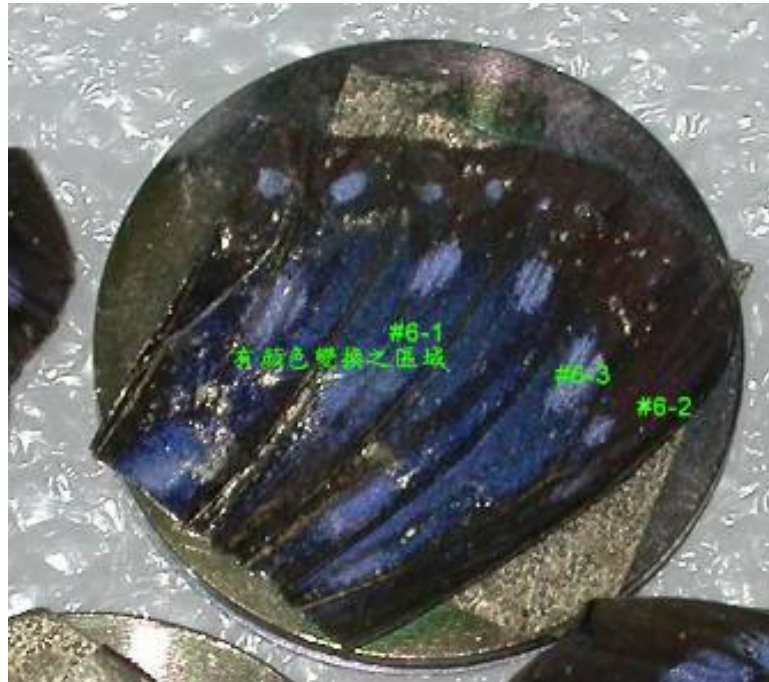
【說明】寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。



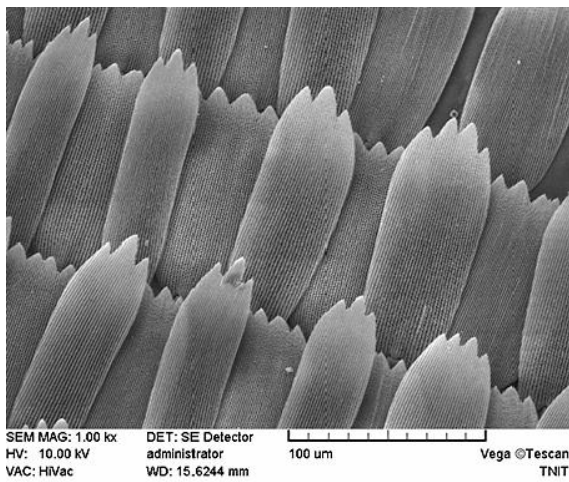
SEM MAG: 40.00 kx DET: SE Detector
 HV: 10.00 kV administrator
 VAC: HiVac WD: 16.7850 mm
 Vega ©Tescan TNIT

小紫斑蝶 # 5-2 (40000 倍)

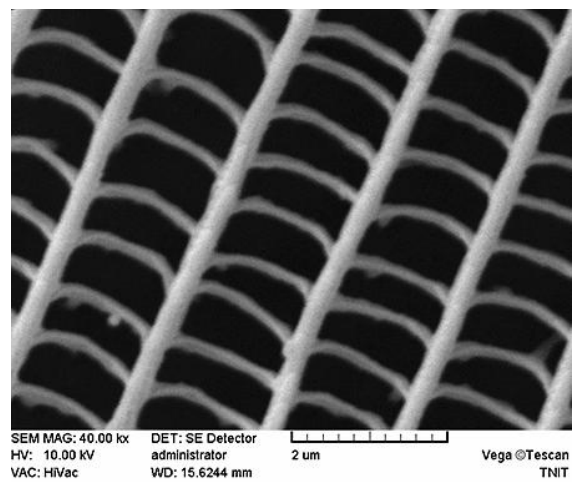
圖十七 以電子顯微鏡觀察小紫斑蝶翅膀不同區域與不同倍率下的細微結構



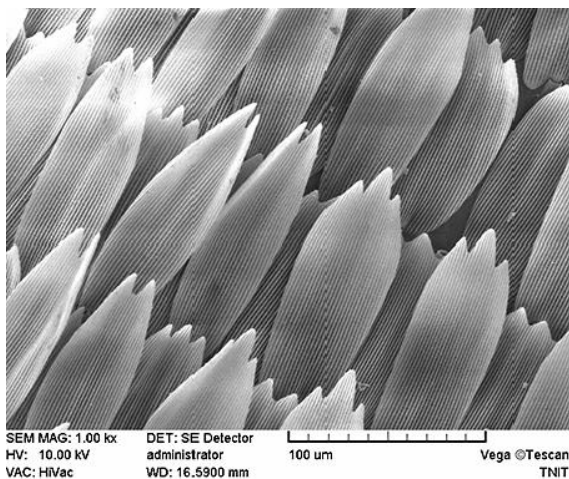
端紫斑蝶取樣位置示意圖



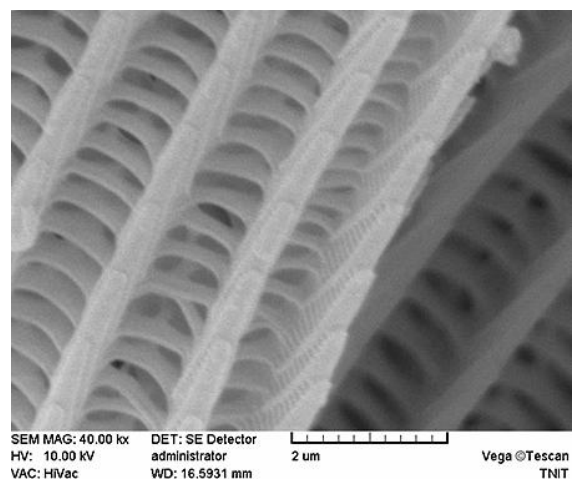
端紫斑蝶 # 6-1 (1000 倍)



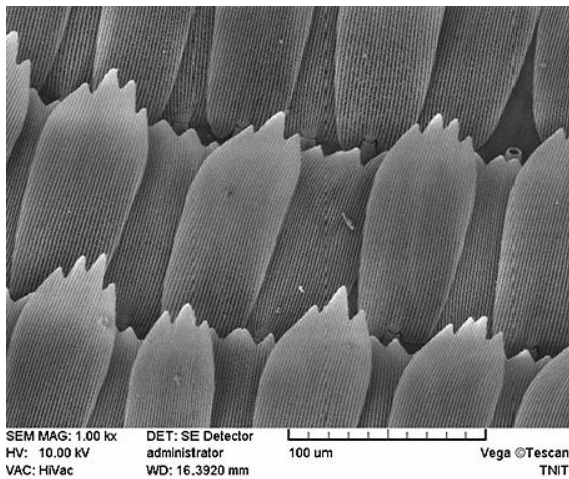
端紫斑蝶 # 6-1 (40000 倍)



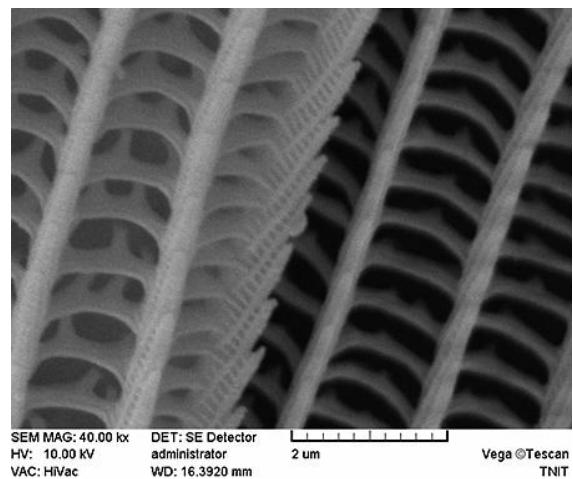
端紫斑蝶 # 6-2 (1000 倍)



端紫斑蝶 # 6-2 (40000 倍)



端紫斑蝶 # 6-3 (500 倍)




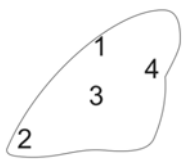
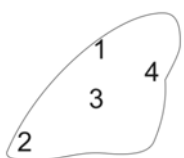
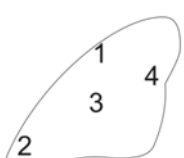
端紫斑蝶 # 6-3 (40000 倍)

圖十八 以電子顯微鏡觀察端紫斑蝶翅膀不同區域與不同倍率下的細微結構

結果：我們認為紫斑蝶幻色與無幻色區域的差別乃因其翅膀細微結構與排列方式不同所造成。具有幻色區域其細微結構不論格子狀的大小或格子狀的排列方式均相似(例如：圓翅紫斑蝶 # 3-1、小紫斑蝶 # 5-1、端紫斑蝶 # 6-1 與 # 6-3)。另外，四種紫斑蝶的翅膀上亦具有自己獨特的鱗片。即使同為紫斑蝶，皆具有幻色的特徵，但在掃描式電子顯微鏡下可明顯看到不同區域具有不同的鱗片排列：可能是單一種鱗片緊密排列、兩種以上鱗片交錯排列彼此有間距不規則散佈、抑或是彼此交疊重合。我們也發現，在無幻色區域中擷取的影像明顯由兩種（細長與寬圓形狀）鱗片構成，幻色區乃由同種寬圓鱗片組成。並且，鱗片排列的疏密程度又因不同種紫斑蝶而異。由此我們推論幻色與無幻色的因素的確不單單只是鱗片在形狀、大小的不同，鱗片分布的位置、疏密、重疊程度，甚至是鱗片傾斜的角度等種種物理性質皆有可能影響到其在陽光下所反射至外界的不同色彩，而幻色明顯程度也隨著先前所提到「蝴蝶拍翅時的角度」而有所差異。我們推論紫斑蝶幻色之差異性乃肇因於鱗片的結構與排列方式所造成。

(三) 以光學顯微鏡觀察並比較十三種斑蝶鱗片微構造 (10×40x)

◎ 排列方式定義	◎ 不同鱗片形狀
極疏鬆：間細可塞 1 個以上的寬鱗片。 疏 鬆：有間細（寬度不到 1 個寬鱗片）。 緊 密：彼此靠近無間細無重疊。 略緊密：彼此靠近有重疊。	 <p style="text-align: center;">寬圓 尖細 細長 窄圓</p>

種類	腹/背面	編號	肉眼所見光學顯微鏡（400X）所得影像
小青斑蝶 	腹面	1.	白色區域：尖細鱗片疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	白色區域：尖細鱗片疏鬆排列。 黑色區域：寬圓鱗片緊密排列。
		3.	寬圓鱗片略緊密排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片略緊密排列。
	背面	1.	白色區域：尖細鱗片極疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	白色區域：尖細鱗片疏鬆排列。 黑色區域：寬圓鱗片略緊密排列。
		3.	白色區域：尖細鱗片疏鬆排列。 黑色區域：寬圓鱗片緊密排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
小紋青斑蝶 	腹面	1.	寬圓鱗片緊密排列。
		2.	寬圓鱗片緊密排列。
		3.	寬圓鱗片緊密排列。
		4.	白色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。 黑色區域：寬圓鱗片略緊密排列。
	背面	1.	白色區域：細長鱗片緊密排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	白色區域：細長鱗片略緊密排列。 黑色區域：寬圓鱗片緊密排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
端紫斑蝶 	腹面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
	背面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	寬圓與窄圓兩種鱗片緊密交錯排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
黑脈樺斑蝶 	腹面	1.	寬圓鱗片緊密排列。
		2.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
	背面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	寬圓鱗片緊密排列。

		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
琉球青斑蝶 	腹面	1.	白色區域：尖細鱗片極疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	白色區域：尖細鱗片極疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		3.	白色區域：尖細鱗片極疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片略緊密交錯排列。
	背面	1.	白色區域：尖細鱗片極疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	白色區域：窄圓鱗片疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與窄圓兩種鱗片緊密交錯排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
大青斑蝶 	腹面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	白色區域：尖細鱗片極疏鬆排列。 黑色區域：寬圓鱗片緊密排列。
		3.	白色區域：尖細鱗片極疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片略緊密排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片略緊密交錯排列。
	背面	1.	寬圓與細長兩種鱗片略緊密交錯排列。
		2.	白色區域：尖細鱗片疏鬆排列。 黑色區域：寬圓鱗片略緊密排列。
		3.	白色區域：尖細鱗片極疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
淡紋青斑蝶 	腹面	1.	寬圓與細長兩種鱗片略緊密交錯排列。
		2.	寬圓與窄圓兩種鱗片緊密交錯排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
	背面	1.	寬圓鱗片緊密排列。
		2.	白色區域：窄圓鱗片疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		3.	白色區域：細長鱗片略緊密排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
斯氏紫斑蝶	腹面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	寬圓鱗片緊密排列。

	背面	3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	寬圓鱗片緊密排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與窄圓兩種鱗片緊密交錯排列。
姬小紋青斑蝶 	腹面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	白色區域：尖細鱗片疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		3.	白色區域：尖細鱗片極疏鬆排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
	背面	1.	白色區域：窄圓鱗片疏鬆排列。 黑色區域：寬圓鱗片緊密排列。
		2.	白色區域：窄圓鱗片疏鬆排列。 黑色區域：寬圓鱗片略緊密排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
圓翅紫斑蝶 	腹面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
	背面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	細長鱗片緊密排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
樺斑蝶 	腹面	1.	寬圓鱗片緊密排列。
		2.	寬圓鱗片緊密排列。
		3.	寬圓鱗片緊密排列。
		4.	白色區域：寬圓鱗片緊密排列。 黑色區域：寬圓鱗片緊密排列。
	背面	1.	寬圓鱗片緊密排列。
		2.	寬圓鱗片緊密排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓鱗片緊密排列。
小紫斑蝶 	腹面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		3.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	白色區域：細長鱗片略緊密排列。

	背面		黑色區域：寬圓鱗片緊密排列。
		1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	寬圓鱗片緊密排列。
		3.	白色區域：寬圓鱗片略緊密排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
	4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。	
大白斑蝶 	腹面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	寬圓鱗片緊密排列。
		3.	白色區域：寬圓鱗片略緊密排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
	背面	1.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		2.	窄圓鱗片疏鬆排列。
		3.	白色區域：寬圓鱗片緊密排列。 黑色區域：寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。
		4.	寬圓與細長兩種鱗片緊密交錯排列。

結果：幻色現象乃因為鱗片反射不同角度的入射光時，鱗片上物理性質的不同而造成。從光學顯微鏡（10×40x）所擷錄的照片檔案中，我們比較後發現：不單只紫斑蝶擁有兩種以上的鱗片，其實其他九種斑蝶在不同區域所衍生的鱗片也具有多樣性。有的鱗片既寬且圓、邊緣具鋸齒狀；有的鱗片則是細窄且尖端明顯。同時，我們所觀察到的翅膀無論是靠近前緣、邊緣、還是近身體基部多皆有不同鱗片同時存在—有的緊密排列，有的彼此有較大的間距。基本上，我們先前曾設想是否因為蝴蝶飛行時是前翅前原先接觸到風，所以可能導致此部位的鱗片種類與分布等較其他部位為不同；然而，經由比較後我們僅發現：鱗片的分布並沒有隨著取樣部位的不同而有明顯的改變，大部分的區域皆同時擁有兩種以上的鱗片緊密交錯排列，由寬圓和細長的鱗片相互交疊而成，而少部位由單一種鱗片構成。此外，並非肉眼所見白色區域即由白色等淺色鱗片組成，它可能尚有其他黑色等較深色的細長鱗片散落其中。同時，我們也發現鱗片頂端的鋸齒狀也是會隨鱗片不同而有所差異的，例如細長的鱗片鋸齒可能有二到四個，而較寬圓的鱗片則是有多個起伏較平緩的鋸齒，更是有所謂尖細無鋸齒的、渾圓無鋒利處的。較近邊緣的區域分布著寬圓與細長的鱗片緊密交錯排列，而內部偏單一種寬圓鱗片排列。我們推想是否較細長、較尖與寬圓鱗片交錯排列的區域在飛行時能產生較大的阻力，可能與其位於邊緣區域有關。而翅膀上則會因為鱗片是多種同時存在、重疊排列、傾斜角度不同而無法做單一比較。僅能肯定的是：翅膀上的確是有許多不同的鱗片，彼此在色彩（反射入射光）、形狀（寬圓、尖細等）、構造（鋸齒狀頂端）有可辨識的差異，至於是否因為不同的鱗片進而在飛行時造成不同的阻力、效果，此乃更需要更精確、更深入的探討與研究。（由於我們的實驗器材有限，因此我們無法對鱗片排列情形進行精密的測量區分，因此只能以現有的器材，進行較為主觀的判斷）

柒、討論

由於蝴蝶飛行的機制極複雜，故本實驗均以蝴蝶翅膀標本為材料，並非取用活體進行檢測，以期單純探討鱗片特性與風阻實驗速度的關連性。蝴蝶飛行時主要是前翅的前脈逆風向前飛行，但因蝴蝶翅膀標本有限，在考量種種因素後，我們決定僅以每隻蝴蝶的右前翅作為測量風阻的樣本。隨後我們也發現，翅膀面積的大小與所造成的風阻之間擁有明顯的相關性，例如：翅膀最大的大白斑蝶其所受的風阻理論上也最大，因此在滑翔過程中，其會被風吹得較快也較遠，而我們的實驗結果也確實發現：大白斑蝶花費最少的時間到達終點；但面積小的小紫斑蝶卻不是費時最久才到達終點的，因此我們推測其可能的原因為：斑蝶翅膀和其飛行之間的相關性，並不是翅膀大小單一因素所造成的，應該還有其他因素參與其中。再者，蝴蝶在往前飛行時，是翅膀前翅的前脈最先接觸到風，因此我們推測翅膀越大，其前翅最大翅長也越長，在風阻實驗中應當受到越大的風，進而在越短的時間內將翅膀帶到測量終點，而我們的實驗結果也證實這項推論。

經由實驗數據與參考資料我們發現，翅長與面積大小皆會對飛行阻力有所影響。由於我們無法單就最大翅長(或翼展)與翅膀面積來討論蝴蝶翅膀的阻力，因此我們參考其他相關研究發現：在動力飛行研究上，一般會以「展弦比」來探討翅膀於飛行時，翅膀的穩定性和各種形式阻力之間的相關性，所以我們亦比較不同蝴蝶翅膀的「展弦比」和其風阻實驗速度(阻力大小)之間的相關性。然而，經由比較不同蝴蝶右前翅展弦比後我們發現，展弦比越大或越小，其實與其所花費的時間是呈現不一定的關係，這並無法證明先前所推論：展弦比越大，花費時間越多。雖然前人研究中發現展弦比大小與飛行阻力大小有密切的相關性，而我們的實驗結果之所以無法支持此理論的原因可能是：我們實驗過程忽略了蝴蝶翅膀偏斜的程度也會造成受風面積有些許差異的影響；另外蝴蝶翅膀之間形狀的不同也會影響阻力的大小，不同蝴蝶翅膀形狀對於空氣流經所造成的阻力差異需要更多精密的實驗與器材才可以精準的量化。但是以我們目前現有的器材與相關技術，我們並沒有辦法將其他變動的因素確實去除，單獨探討展弦比、面積與翅長在蝴蝶飛行時所造成的影響。

另外，在測量蝴蝶翅膀親疏水性實驗中，我們測量蝴蝶翅膀之親疏水性是用水珠上半部似橢圓的半短軸除以長軸，所以測量出來的數據若越大，則代表水珠越圓(也可說是越尖)、此翅膀疏水性越大；相反的，若所測量出來的數據越小，則代表翅膀親水性越大。將翅膀親疏水性的結果和風阻的實驗結果作比較，發現斑蝶翅膀的親疏水性和其風阻實驗的速度並沒有很明顯的相關性。我們原本認為蝴蝶翅膀若越具疏水性，在飛行的過程中，其較不會受空氣中水氣附著的影響，在飛行時較能減少阻力，而達到較快的飛行速度；再者，如果翅膀表面附著水分，除了造成重量增加之外，也會影響蝴蝶翅膀的上表面的形狀，進而可能因表面形狀改變而影響阻力。然而，事實上蝴蝶在空中飛行時的介質的確是空氣而非水，所以親疏水性實驗只能探討翅膀的特性，實際上並無法量化蝴蝶翅膀在空氣中的黏滯阻力。而且實驗過程中我們發現不論是何種蝴蝶，其翅膀的疏水性均極高，所以推測對蝴蝶而言，親疏水性程度應並不會造成重量的明顯增減。

我們認為斑蝶的鱗片排列情形除了會影響幻色之外，可能對其飛行也會造成影響。因為整體而言，鱗片排列的方向沿翅膀與身體垂直、從翅膀基部延伸至翅緣，途中因翅脈形成不同的區隔，造成排列角度的偏斜（非一直與身體垂直九十度延伸），而且每隻蝴蝶的翅膀生長時與身體並不呈現一定的角度，所以同一種斑蝶又會有不同的數據，即其翅膀在風阻實驗中與其真實擺放的角度又有所差異。同時，鱗片尚會隨著不同的區塊（顏色、翅脈分隔區間等）而有不同的重疊高度，這也會影響到我們風阻實驗中所產生的阻力。我們曾經有考慮過將不同區塊（將右前翅分割為與用光學顯微鏡拍照時一樣的四個區域）分別再另外放到另一個自製微量風阻實驗中進行更小範圍之間的些微差異。然而，經由實驗卻發現分割蝴蝶翅膀後更難測出完整的數據，且所測量出的數據有極大的誤差，分割後的小翅膀樣本在面臨風吹時左右搖顫的更劇烈。所以我們無法採用此實驗，而改為整片右前翅來做為主要測量樣本。

生物微結構的研究是生物模仿學中重要的研究之一。在自然界中，生物微結構扮演著重要的角色。如 *Morpho sulkowskyi* 此種蝶類，其翅膀上之微結構會因為光線不同的照射情況而顯現出不同的顏色，此種特性提供了 *Morpho sulkowskyi* 自我保護及警告天敵之能力。此外，微結構的另一項功能則為自我清潔能力，*Morpho sulkowskyi* 翅膀可因此種特殊之結構而提高其表面的疏水性，使其翅膀上的水珠易於排除而不至於影響其飛行。部份的植物與雁、鴨等動物類似的自清潔機制：雁鴨的羽毛表面主要組成成份亦為油脂類，而羽毛的層狀微結構中又藏有空氣，所以雁鴨即使在水中也不會弄濕羽毛，不會造成其飛行時的阻力，在空中飛翔時更可藉此來降低與空氣間的摩擦力，使飛行時更省力。而蝴蝶翅膀的微小構造皆有像蓮花般的粗糙結構，其粗糙度比較均勻，經光照反射形成亮麗的顏色與奈米粗糙度有相當的關聯性，故翅膀表面微結構仍是影響我們實驗結果的主要變因之一。

捌、結論

- 一、斑蝶翅膀面積與其風阻實驗中的速度成顯著的正相關 ($R=0.783326$)。
- 二、斑蝶右前翅最大翅長與其風阻實驗中的速度成明顯的正相關 ($R=0.683154$)。
- 三、展弦比越大或越小，其實與其所花費的時間是並非呈現明確的關係($R=0.287054$)。
- 四、我們推論不同種斑蝶翅膀在實驗中花費不一樣的時間乃肇因於翅膀表面微結構的不同：不同的鱗片造成不同的阻力、鱗片的錯綜排列比單一排列阻力可能來的大、鱗片的方向造成不同的風阻等，皆有可能影響。
- 五、斑蝶翅膀的親疏水性並不會影響其風阻實驗中的速度 ($R=0.098995, 0.160312$)
- 六、不同紫斑蝶之間相對於人眼的幻色程度又有所不同，隨著仰角的提升，不僅幻色逐漸變的較不明顯，連整體的顏色都較仰角較小時黯淡。而且，仰角越高，越難辨識其幻色與不幻色的差別。
- 七、翅膀之所以有幻色現象則是因鱗片等微結構的不同。其中圓翅紫斑蝶、小紫斑蝶在幻色區域是由同種較寬圓的鱗片排列而成，無幻色區由細長與寬圓鱗片交錯排列而成；端紫斑蝶則是皆由兩種鱗片交錯排列；斯氏紫斑蝶則在無幻色區域是由兩種較寬圓的鱗片交錯排列而成，幻色區由寬圓鱗片排列而成。

玖、參考資料

- 一、詹家龍（2006）。台灣產紫斑蝶屬之季節性移動，Seasonal Movement of the *Euploea* spp. (Lepidoptera; Nymphalidae; Danainae) in Taiwan。2006 年自然資源保育暨應用學術研討會－論文集，中華民國自然生態保育協會，102-121。
- 二、程暮林（2001）。昆蟲的振翅飛行原理研究發展，The Improvement of Insects Flight。北京大學君政學者論文集。
- 三、方得華等。蝴蝶翅膀之奈米結構與親疏水性研究。機械研討會。
- 四、楊冠政（主編）。高中生命科學課本下冊第六章第四節『動物的行爲』。龍騰文化事業公司，68-70，2006。
- 五、大衛·卡特著。彩蝶與飛蛾圖鑑。貓頭鷹出版社。
- 六、P. Vukusic, J. R. Sambles, C. R. Lawrence² and R. J. Wootton (1999), Quantified interference and diffraction in single *Morpho* butterfly scales, Proc. R. Soc. Lond. B 1403-1411
- 七、R. B. Srygley & A. L. R. Thomas(2002), Unconventional lift-generating mechanisms in free-flying butterflies, Nature, 420, 660-664

拾、未來展望

- 一、利用活體蝴蝶為材料測量相關數據，以期推論蝴蝶翅膀特性與飛行能力的相關性。
- 二、改善風阻實驗的設計，消除其他較不穩定的變因，取得更確實的數據。
- 三、以掃描式電子顯微鏡進行更多其他種斑蝶的鱗片分析，進而比較其微結構與飛行時造成的阻力之關係。

拾壹、特別感謝

- 一、台灣蝶會研究員詹家龍先生提供斑蝶樣本及斑蝶遷徙相關資料。
- 二、東南技術學院李志偉教授提供掃描式電子顯微鏡。
- 三、牛伯伯蝴蝶園區提供蝴蝶相關資料。

【評語】 040703 展翅高飛--探討台灣十三種斑蝶翅膀特性

探討台灣斑蝶翅膀特性與飛行之關係，深具本土特色，此類探討過往亦有許多研究，宜多比較並探討飛行距離，是否與高空氣流及滑翔有關。翅膀微結構與幻色現象的觀察深入完整若能再把微結構與飛行關係作進一步比較觀察更佳。